tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 51 — Nr. 5/6 — 1986

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, 2260AA Leidschendam. Gironummer 94746
t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

De vereniging stelt zich ten doel het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de elektronica en de informatietransmissie en - verwerking te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

LIDMAATSCHAP

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt. De contributie bedraagt ƒ 60,- per jaar.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt ƒ 60,- . Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

VEDERPRIJZEN 1985

Op 16 september en 30 oktober werden de Vederprijzen 1985 - toegekend door de Stichting Wetenschappelijk Radiofonds Veder - uitgereikt aan Ir. W. van Eck van het Dr. Neher Laboratorium van de PTT en aan Dr. H.C. Nauta van de TU in Delft.

Deze in 1927 door Anton Veder opgerichte stichting heeft tot doel onderzoekers, die op het gebied van de ontwikkeling van wetenschap en techniek met betrekking tot radiotelecommunicatie, in de ruimste zin, baanbrekend werk hebben verricht, een prijs toe te kennen, of ondersteuning te geven.

De prijzen werden uitgereikt op werkvergaderingen van het NERG door de voorzitster van het fonds, mevrouw E.J. Kosters-van Hoboken, kleindochter van de stichter.

Prof. A.Kok en Prof. J.C.Arnbak, beiden lid van het bestuur van het Wetenschappelijk Radiofonds Veder, verzorgden de consideransen.



Considerans bij de uitreiking van de Veder-prijs aan ir. W. van Eck, uitgesproken tijdens de 344e werkvergadering van het NERG door prof.Ir. A.Kok, TUT.

PTT organisaties over de hele wereld zorgen voor het transport van de aan hen toevertrouwde informatie en voor de bescherming daarvan. Briefgeheim en telefoongeheim zijn min of meer voor iedereen een vanzelfsprekendheid.

Toch zal kwaadwillig schenden van deze geheimen niet helemaal zijn uit te sluiten. Brieven kunnen, ook al zijn ze goed bezorgd, in verkeerde handen komen. Ongemerkt manipuleren op telefooncircuits is niet helemaal onmogelijk; afluister- en spionagetechnieken zijn zeer sterk ontwikkeld.

Desondanks heeft de gemiddelde burger een blind vertrouwen in de privacy van zijn communicaties via PTT, waar al het redelijke wordt gedaan om dit vertrouwen ook waard te zijn. Overigens zullen belanghebbenden er in het algemeen wel voor zorgen dat echt vertrouwelijke informatie niet zomaar voor jan en alleman toegankelijk is.

Geeft men echter informatie weer op een onbeschermde video display unit, dan ligt die informatie wel voor een ieder voor het grijpen. Videoterminals stralen elektromagnetische velden uit waarop de informatie is gemoduleerd. Door het typisch digitale karakter van de te representeren signalen, blokvormige signalen met grote flanksteilheid, bevatten de frekwentiecomponenten die tot in de UHF band reiken. Het is vooral het hoge spanningsniveau in de elektronenstraalconfiguratie in beeldschermbuizen dat er de oorzaak van is dat een relatief hoog stralingsniveau van het informatiesignaal ontstaat. Deze signalen kunnen in de UHF band niet alleen als mogelijk storend worden ervaren; door de periodiciteit in de structurele opbouw van het signaal vertoont het spectrum ook een zekere periodiciteit. Eén zo'n periode vertoont zeer veel gelijkenis met een TV-signaal waarop de broninformatie van de beeldschermapparatuur is gemoduleerd. Die informatie is dan ook via een TV-ontvanger te reproduceren. Om dit goed te laten verlopen is in het algemeen slechts toevoeging van een eenvoudige synchronisatieschakeling nodig. Op deze wijze is afkijken van beeldschermapparatuur mogelijk tot op vrij grote afstand, in de orde van honderden meters, soms zelfs tot enkele kilometers afstand. De (eventueel vertrouwelijke) informatie ligt zo dus inderdaad voor het grijpen. Let wel: ook in het geval dat de gehele verbinding tot aan de terminal met kryptografische technieken zou zijn beveiligd.

Dat in principe deze afkijkmogelijkheid bestond was in bepaalde kringen reeds lang bekend. Het is de verdienste van de prijswinnaar, de heer ir. W. van Eck,

1. dat hij zich de eenvoud van deze afkijkmogelijkheid duidelijk heeft gerealiseerd en daarbij als ontoelaatbaar heeft beoordeeld, ondanks het feit dat in het algemeen aan de CISPR waarden met betrekking tot het toelaatbare stoorniveau wordt voldaan.
2. daar alert op heeft gereageerd met het zoeken naar mogelijkheden om dit parasitaire afkijkcircuit aan de "openbaarheid" te onttrekken,
3. dat hij goed oog heeft gehad voor andere mogelijkheden dan de vrij dure en reeds bekende oplossingen voor het terugbrengen van het stralingsniveau, en dat hij een goedkope oplossing heeft gevonden in het toepassen van kryptologie voor deze parasitaire link, daarmee een betaalbare oplossing inbrengend voor de bescherming van informatie op beeldschermapparatuur voor civiel gebruik. Deze oplossing bestaat eruit de lijnen van het beeld in een quasi-random volgorde te schrijven; de codesleutel is daarbij instelbaar,
4. dat hij de problematiek op adequate wijze in de publiciteit heeft gebracht en gedemonstreerd.

Daardoor heeft de afkijkmogelijkheid inmiddels internationaal bekendheid gekregen als het van Eck-phenomenon.

Ir. van Eck, U bent werkzaam op de afdeling Propagatie en Elektromagnetische Compabiliteit van het dr. Neher Laboratorium. Daarbinnen valt niet een taakstelling betreffende geheimhouding van informatie in de zin als nu en hier aan de orde gesteld. U heeft zich daardoor niet laten weerhouden daaraan toch een bijdrage te leveren.

Het zijn overwegingen als door mij zojuist ten aanzien van Uw aktiviteiten opgesomd die voor het bestuur van het WERA-fond Veder aanleiding waren U de Veder-prijs toe te kennen op grond van een belangrijke bijdrage op het gebied van bescherming van informatie, gerepresenteerd op beeldschermapparatuur, tegen ongewenst afkijken.

De fotodienst van het Dr. Neher Laboratorium verzorgde de foto.

Considerans voor de toekenning van de Vederprijs aan Dr.ir. H.C.Nauta, uitgesproken tijdens de 346e werkvergadering van het NERG door Prof. J. Arnbak, TU Delft.

Mr. Chairman of the NERG, Ladies and Gentlemen.

You may well wonder why a radio communications prize is to be awarded at an underwater conference. I hasten to explain that we are not here today to challenge your theme with the moral judgement of the Roman author Virgil, who - in English translation - stated:

"Easy is the way down to the Underworld; by night and by day this dark door stands open, but to withdraw one's step and to make a way out to upper air, that is a task, that is the labour!"

Mr. Chairman, please be assured that we are not here today to preach that air communication is a more elevated subject than underwater communication, but simply because the prize winner was unable to attend a previous meeting of the NERG where the other Veder Prize 1985 was awarded.

As the president of the Veder Scientific Radio Foundation, Mrs. Kosters-van Hoboken informed you, the annual award had since 1929 been given for that Dutch invention or methodology which has contributed most to the general development of radio communications in the country in the past year.
Today's award does not cover either an invention or a methodology; it concerns both! It is awarded for a general broad methodology for analysing front-ends of radio receiver systems, given the new anabling technology of monolithically integrated micro-electronics. But it is also given for a novel type of AM-radio receiver, containing some very inventive uses of analogue IC techniques.
The Board of the Veder Foundation felt that this dual and broad attitude merited a professional recognition.

It is no use denying that such a broad orientation is not at all common. It is even the question whether our present educational system does not encourage deep specialism above system engineering. This may have led to the rather fruitless discussions about the scientific and managerial choice between system generalists and device specialists. The former are often having a so-called helicopter view over a large number of completely black boxes; the latter are sometimes acting as an expert witness sitting in a much safer position - in just one of those little boxes!
But a good radio designer should possess both a helicopter view of system requirements, and a microscopic eye for the constraints and opportunities of micro-electronic technology. In the doctor's thesis "Fundamental Aspects and Design of Monolithically Integrated AM Radio Receivers" defended by Ir. Henk C. Nauta at this University on 11 February of this year, with Professor Davidse as the promotor, both of these aspects are in evidence. Dr. Nauta has seen fit to challenge the classical superheterodyne downconversion receiver, which requires tunable narrowband filters - and they are still something horrible to all the smart IC device designers. Dr. Nauta consequently abandoned downconversion for upconversion, and so restricted tuning to the local oscillator alone, which is much easier to implement in present IC technology.



However, the price paid for this acceptance of less filter selectivity is of course a need for better overall management of intermodulation products and system interference. Dr. Nauta's contribution in this field was the realisation of a doubly-balanced switching mixer design with superior dynamic range, in bipolar technology. Another contributing invention was the development of a phase locked loop acting as a synchronous detector, which because of its linearity allows some extra filtering to be added after the demodulation of the AM signal. Communication engineers will recognize that the use of a synchronous detector is another unconventional approach with amplitude-modulated signals, which lend themselves to the more customary envelope detector.

However, the notion of "simplicity" changes fundamentally, whenever device technology is transformed. Dr. Nauta's thesis and two papers that he published in the IEEE Journal of Solid State Circuits in June 1985, together with Dr. Nordholt (who incidentally was a winner of the Veder Prize in 1980), demonstrate this transformation of system engineering under the impact of new special device possibilities and limitations of micro-electronic. The two papers dealt with modern integrated car radio receivers, already now an important commercial area, which will grow tremendously in social importance in the years to come, as public mobile and portable telecommunications are introduced.

Ladies and Gentlemen.

The Board of the Veder Foundation has decided unanimously to award the prize of ƒ 5000,- to Dr.Ir. H.C. Nauta for his "zeer verdienstelijke implementatie van een geïntegreerde AM-ontvanger, voortgekomen als vrucht van zijn systematische algemene analyse van mogelijke ingangstrappen van radio-ontvangers".

Dr. Nauta. Let it be no secret that you have earned the Veder-award by putting micro-electronics in a broader perspective of communication systems. By not seeing modern IC technology in isolation, but in connection with criteria and needs derived outside the province of chips, you were able to propose very creative solutions to a classical engineering problem forty years older than microelectronics itself. The surprising answers in systems engineering became possible, only because you saw that a conventional question could be asked in a new way!

De fotodienst van de faculteit E van de TU delft verzorgde de foto.

AN ACHIEVABLE RATE REGION FOR THE BINARY MULTIPLYING CHANNEL, USING FIXED LENGTH STRATEGIES.

W.M.C.J. van Overveld
Eindhoven University of Technology

The Binary Multiplying Channel (BMC) is a two-way channel for which the capacity region is unknown. Schalkwijk has shown that the symmetric rate point R = .63056 is achievable, using a strategy of infinite length, based upon a Markov chain model. Here we prove the achievability of the above rate with block codes. We do this by showing that a "truncated" version of the Schalkwijk strategy, with some adjustments, behaves essentially in the same way as the original strategy.

1. Introduction

In figure 1, the BMC is depicted. The two users, user 1 and user 2, are located at the left and right end of the channel, respectively. User i wants to transmit a message θ_i to user j ($i \in \{1,2\}$, $j \in \{1,2\}$, $i \neq j$) This is done by transmitting a sequence of bits X_i, where each bit may depend on the previously received bits Y ($Y = X_1 \cdot X_2$), and on the message θ_i. Hence if we speak of codes here, we really mean strategies instead.

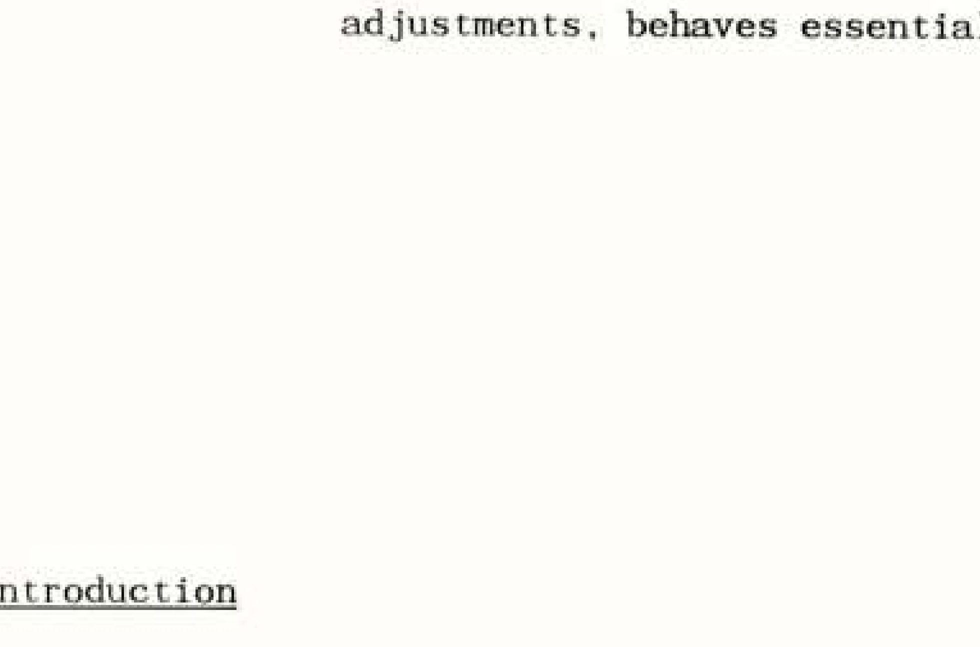


Figure 1: the Binary Multiplying Channel.

Let R_1 (R_2) denote the rate in the $1 \rightarrow 2$ ($2 \rightarrow 1$) direction. Since we will look at symmetrical strategies only, we define $R := R_1 = R_2$. We say that R is achievable if there exists a sequence of strategies $S_{(n)}$ with rate $R_{(n)}$ such that $R_{(n)} \rightarrow R$ and the error probability tends to zero if $n \rightarrow \infty$. Also, see (Hekstra 1985). As an example, it is easy to see that R = .5 is achievable, using timesharing. In (Shannon 1961) it is proved that R = .61695 is achievable with fixed length strategies. Schalkwijk has shown that R = .61914 is achievable using a strategy of infinite length, derived from a Markov chain model (Schalkwijk 1982). We will briefly summarize his method, and show how this can be adapted for fixed length strategies. In 1983 Schalkwijk improved his strategy by a technique called bootstrapping, now achieving rate R = .63056 (Schalkwijk 1983). We will demonstrate how this improvement can be translated into fixed length strategies achieving the same rate. It is conjectured that this rate is the actual capacity of the BMC.

2. Schalkwijk's 1982 strategy used for block codes

Each message θ_i is considered as a subinterval of the [0,1] interval. Hence the simultaneous transmission of independent messages θ_i and θ_2 can be seen as the subdivision of the unit square into subrectangles $\theta_1 \times \theta_2$. In (Schalkwijk, 1982) this subdivision is done as in figure 2, for some fixed parameters α and γ.

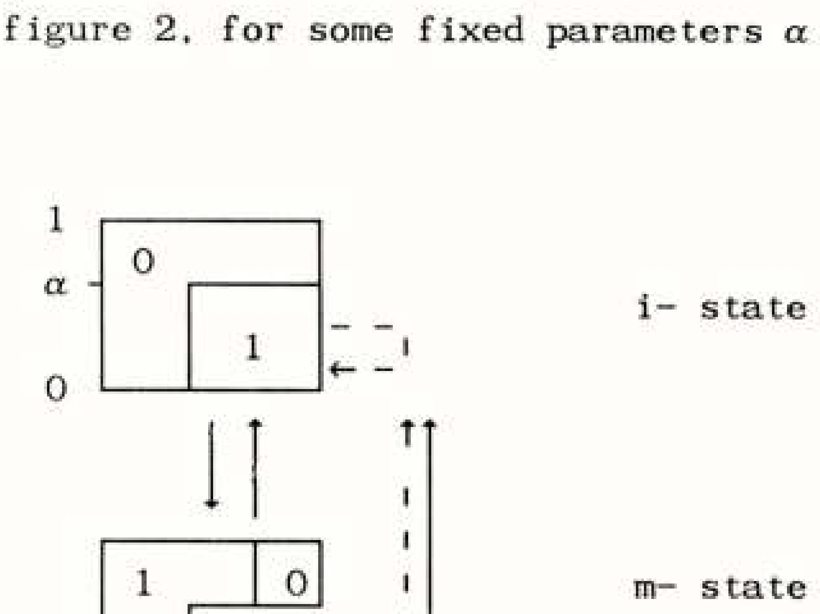


Figure 2: Division of the unit square according to Schalkwijk.

This is in fact a Markov chain, implying a code of infinite length. Its rate is

$$R_0 := q_i I_i + q_m I_m + q_o I_o \tag{1}$$

where for $s \in \{i,m,o\}$: q_s := the stationary probability of state s, and I_s := the rate of uncertainty reduction in state s. We have:

$$\begin{aligned} I_i &:= \alpha h(\alpha) \\ I_m &:= \frac{1}{1+\alpha}\cdot h(\gamma) \\ I_o &:= \frac{1}{2-\beta}\cdot h(\beta) \\ \beta &= (1-\alpha)/\gamma \end{aligned} \tag{2}$$

Choosing $\alpha = .67571$, $\gamma = .52545$, we have $R_0 = .61914$. Based on this strategy, we construct a sequence of block codes with increasing block lengths. We show that these codes have rate pairs approximating R_0 as closely as desired, if the block length is sufficiently large, whereas the error probability tends to zero exponentially. This is stated in the following theorem. Also see (Tolhuizen 1985).

Theorem 1. for all $\delta > 0$ and p large enough, there is a block code C_p with rate R_C such that $R_C \geq R_0 - \delta$ and the error probability tends to zero exponentially.

Scetch of Proof. For given δ, ϵ and p, we define the set of rectangles V_p as follows. V_0 := {the unit square}. V_{p+1} follows from the set V_p if we apply the basic division given in figure 3 to all rectangles of V_p. By S_p we denote the strategy that describes the division of the unit square into the rectangles of V_p. Hence S_1 is the basic strategy and S_{p+1} is the "concatenation" of S_p and S_1.

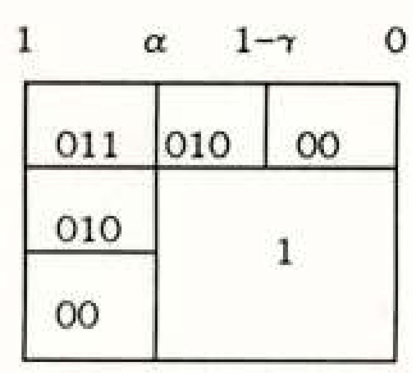


Figure 3: Basic subdivision according to S_1.

For a rectangle r in V_p we define:

$n_p(r)$:= length of output sequence determining r, using S_p

$b_p(r) := -\log_2(\text{breadth}(r))$

$h_p(r) := -\log_2(\text{height}(r))$

Let N, B and H be the mean values of $n_1(r)$, $b_1(r)$ and $h_1(r)$ respectively. Hence pN is the mean of $n_p(r)$, and the same for pB and pH. A rectangle r is called "typical" if $|z_p(r) - pZ| \leq p\epsilon$, for z = n, b and h.

Now we describe the code C_p. Each user has M_p equiprobable messages:

$$M_p := \lfloor 2^{p(B+2\epsilon)} \rfloor$$

A message pair is a point in the lattice L_p:

$$L_p := \{ \frac{(i+1/2)}{M_p}, \frac{(j+1/2)}{M_p} \mid 0 \leq i,j < M_p \}.$$

We can prove that "almost all" lattice points lie in typical rectangles, if $p \to \infty$ (i.e., the probability of a point not lying in a typical rectangle tends to zero exponentially).

To identify the message point, both users apply strategy S_p, but they do at most a_p transmissions, $a_p := \lceil p(N+\epsilon) \rceil$. With this, they try to isolate the rectangle, r, in which the point lies. There are two possibilities.

A. If r is typical, then $n_p(r) \leq a_p$, so r is known to both users after a_p transmissions. Now r contains at most $\lceil 2^{-p(B-\epsilon)} \cdot M_p \rceil$ vertical lattice lines, since $b_p(r) \geq p(B-\epsilon)$. By definition of M_p, there are at most $\lceil 2^{3p\epsilon} \rceil$ vertical lines in r. So user 1 can specify his message in $\lceil 3p\epsilon \rceil + 1$ extra transmissions (using binary search), and so can user 2. Hence it requires at most ℓ_p bits to specify the message pair, $\ell_p := a_p + 2\lceil 3p\epsilon \rceil + 2$. If less bits are needed, we fill up with dummy letters.

B. If r is not typical then both users send $2\lceil 3p\epsilon \rceil + 2$ dummy letters.

Now C_p is a block code of length ℓ_p with error probability tending to zero exponentially. Its rate R_C is given by:

$$R_C = \frac{\log_2 M_p}{\ell_p} \geq \frac{p(B+2\epsilon) - 1}{p(N+\epsilon) + 6p\epsilon + 5}.$$

Hence with $p \to \infty$ and $\epsilon \to 0$ we have

$$R_C > R_0 - \delta, \text{ since } R_0 = B/N. \tag{3}$$

3 Bootstrapping the strategy

In this section we describe the improvement that can be made to the above strategy if we proceed as in (Schalkwijk 1983). The idea behind this is the following. In the m-state (fig.1) we can reach a higher rate if we encode several m-state bits simultaneously. This is

possible because the inputs are correlated, and we can use a result by Slepian and Wolf (Slepian 1973). The details of this will be described later in this section. Using this, Schalkwijk has shown that R_1 is achievable:

$$R_1 := R_0/(q_i + q_m\eta_1 + q_o) \quad (4)$$

where $\eta_1 := I_m/R_0$. Repeating this technique we can construct a sequence of achievable rates, R_n:

$$R_n := R_0/(q_i + q_m\eta_n + q_o), \qquad \eta_n := I_m/R_{n-1}.$$

This sequence tends to a limit R, which is also achievable:

$$R := (q_i I_i + q_o I_o)/(q_i + q_o),$$

which yields R = .63056 if α = .69070, γ = .53073.

In this paper we will only show the achievability of R_1 with fixed length strategies; the induction argument needed to obtain R_n (and R) is the same as in (Schalkwijk 1983).

We are going to construct a sequence of codes C_t, with rate tending to R_1 if $t \to \infty$.

Theorem 2. For all $\delta > 0$ and t large enough, there exists a block code C_t that allows at least $\lceil (R_1-\delta)t \rceil$ bits to be transmitted in t transmissions, with error probability tending to zero exponentially in t.

Scetch of Proof. The notation is as in Theorem 1. Let $\delta > 0$, $\epsilon > 0$, $t > 0$. Let p be the largest integer for which (5) holds.

$$t \geq a_p \cdot b_p + p(\ell_p - a_p). \quad (5)$$

Here, a_p and ℓ_p are as in Theorem 1, and b_p is defined in (6).

$$b_p := \lceil p - p(q_m-\epsilon) + p(q_m+\epsilon)\frac{I_m + \epsilon}{R_0 - \epsilon} + 1 \rceil \quad (6)$$

With (3) and (4) it follows that

$$R_1 = \frac{B}{N\,(1 - q_m + q_m\eta_1)}$$

Therefore it is possible to choose ϵ such that

$$\frac{B + 2\epsilon}{(N+\epsilon)(1-(q_m-\epsilon)+(q_m+\epsilon)\cdot\left\{\frac{I_m + \epsilon}{R_0 - \epsilon}\right\}) + 6\epsilon} \geq R_1 - \delta/2.$$

Hence we can choose p so large that (7) holds.

$$\frac{p\,\lfloor p(B + 2\epsilon) \rfloor}{a_{p+1}\cdot b_{p+1} + (p+1)(\ell_{p+1} - a_{p+1})} \geq R_1 - \delta \quad (7)$$

We are going to construct the block code C_t. This code has block length t; we shall only use $a_p \cdot b_p + p(\ell_p - a_p)$ transmissions for the sending of information. The remaining transmissions (if any) consist of dummy bits. We must show that it is possible to transmit $\lceil (R_1-\delta)t \rceil$ information bits with the code. In fact, we transmit $p\lfloor p(B+2\epsilon)\rfloor$ bits with it; this is at least as many bits as was required, since

$$\begin{aligned} &p\lfloor p(B+2\epsilon)\rfloor \\ &\geq \lceil (R_1-\delta)(a_{p+1}\cdot b_{p+1} + (p+1)(\ell_{p+1} - a_{p+1})) \rceil \\ &\geq \lceil (R_1-\delta)t \rceil. \end{aligned}$$

The first inequality follows from (7) and the second one from the definition of p.

The bits that will be transmitted are split up as the information of p message pairs (m_1, m_2) with

$$m_i \in \{1, 2, \ldots, 2^{\lfloor p(B+2\epsilon)\rfloor}\},\ i = 1,2.$$

The p pairs are denoted $(m_1, m_2)_1$, $(m_1, m_2)_2, \ldots, (m_1, m_2)_p$. Each message can assume at most M_p values as defined in Theorem 1. Hence every pair $(m_1, m_2)_j$ can be transmitted with the code C_p constructed in Theorem 1. Then we need ℓ_p bits per pair, and the error probability per pair decreases exponentially in p.

The p pairs are coded simultaneously in the following way. First consider user 1. Let the pair $(m_1, m_2)_j$ correspond to $((x_1)_j, (x_2)_j, \ldots, (x_{\ell_p})_j)$, denoting a sequence of bits of X_1 (which would be sent by user 1 in the code C_p). Then user 1 transmits: $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \ldots, \mathcal{P}_{\ell_p}$ where $\mathcal{P}_i$ contains the information about $((x_i)_1, (x_i)_2, \ldots, (x_i)_p)$ for $1 \leq i \leq \ell_p$. $\mathcal{P}_i$ is called the ith packet.

With a_p as in Theorem 1, we distinguish between $i \leq a_p$ and $i > a_p$.

If $i > a_p$, then $\mathcal{P}_i := ((x_i)_1, (x_i)_2, \ldots, (x_i)_p)$, so $\mathcal{P}_i$ contains p bits. No further coding takes place.

For $i \leq a_p$ we proceed in the following way. The bits $(x_i)_1, (x_i)_2, \ldots, (x_i)_p$ correspond to transmissions in the Schalkwijk strategy (figure 2). For each bit we can say whether it is transmitted in the i-, m- or o-situation. Let M:= the number of bits among these p that are transmitted in m-states.

The packet $\mathcal{P}_i$ will contain b_p bits (see (6)), but the

meaning of those bits depends on M. If $|M-q_m p| > \epsilon p$ then the b_p bits are random; otherwise we first transmit the p-M bits that are in i- or o-states. The remaining M bits are compressed to $\lceil (I_m+\epsilon)M \rceil$ bits, which is possible with the Slepian-Wolf technique. See (Slepian 1973) and (Schalkwijk 1983). It can be shown that the error probability for this compression decreases exponentially with M, and hence with p.

Similarly, user 2 sends packets of bits of X_2; if packet $\mathcal{P}_i$ with $i \leq a_p$ has $|M-q_m p| \leq \epsilon p$, he compresses the M bits to $\lceil (I_m+\epsilon)M \rceil$ bits. Now both users add dummy bits until they have $\lceil (I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p \rceil$. The transmission of these bits can be done with a code C_p, mentioned in Theorem 1, with p' such that the rate is $R_0-\epsilon$. Then we need at most t' transmissions for this,

$$t' := \lceil (I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p/(R_0-\epsilon) \rceil . \qquad (8)$$

Therefore the information of the total packet $\mathcal{P}_i$ is contained in at most

$$\max \{b_p,\ p - M + \lceil (I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p/(R_0-\epsilon) \rceil\}$$

bits. Since

$$p - M + \left\lceil \frac{(I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p}{R_0-\epsilon} \right\rceil \leq p - M + \frac{(I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p}{R_0-\epsilon} + 1 \leq p - (q_m-\epsilon)p + \frac{(I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p}{R_0-\epsilon} + 1 \leq b_p,$$

we can fill up each packet $\mathcal{P}_i$, $i \leq a_p$, until it contains b_p bits.

Summarizing, we transmit a_p packets containing b_p bits each, and (ℓ_p-a_p) packets containg p bits. So the total number of transmissions is $a_p \cdot b_p + p(\ell_p-a_p)$, which is what we had to show.

It remains to show that the error probability tends to zero exponentially with t. Errors can occur in one of the four following ways.

1. There is an i, $1 \leq i \leq a_p$, such that the ith packet has $|M-q_m p| > q\epsilon$, and the Slepian-Wolf scheme is not applied.
2. There is an i, $1 \leq i \leq a_p$, such that the Slepian-Wolf scheme does not work for the ith packet.
3. There is an i, $1 \leq i \leq a_p$, such that the code C_p, does not allow the correct transmission of the $\lceil (I_m+\epsilon)(q_m+\epsilon)p \rceil$ bits of the ith packet.
4. There is a message pair $(m_1, m_2)_j$, $j \in \{1,2,\ldots,p\}$, for which the code C_p does not work (even though the information in all packets is transmitted correctly).

The probabilities in case 1, 2 and 3 are bounded by a_p times the error probabilities per packet; since we know that the error probabilities per packet tend to zero exponentially with p, and a_p is linear in p, the first three probabilities decrease exponentially in p. The fourth probability equals p times the error probability of the code C_p, and hence it decreases exponentially in p as well.

By definition of p, we have $p^2 \geq A \cdot t$ for some constant A. Hence if the total error probability decreases exponentially with p, it also decreases exponentially with t.

Acknowledgment

The author wishes to thank Prof. J. P. M. Schalkwijk, P. J. Hazewindus and F. M. J. Willems for their contributions to this research. Many thanks are also due to the N.E.R.G. for their grant which made it possible to present these results at the IEEE Symposium on Information Theory, 1986, Ann Arbor, Michigan.

References

A. P. Hekstra, "Nieuwe bovengrenzen aan het capaciteitsgebied van het tweeweg kanaal", tijdschrift N.E.R.G., 1985.

J. P. M. Schalkwijk, "The Binary Multiplying Channel - A coding scheme that operates beyond Shannon's inner bound region", IEEE Trans. Inf. Th., vol IT-28, pp. 107-110, Jan. 1982.

J. P. M. Schalkwijk, "On an extension of an achievable rate region for the Binary Multiplying Channel", IEEE Trans. Inf. Th., vol IT-29, pp. 445-448, May 1983.

C. E. Shannon, "Two-way Communication Channels", Proc. 4th Berkeley Symp. Math. Statist. and Prob. Vol.1, pp 611-644, 1961. Reprinted in "Key papers in the development of information theory", D. Slepian. ed. New York: IEEE 1974, pp 339-372.

D. Slepian and J. K. Wolf, "Noiseless coding of correlated sources", IEEE Trans. Inf. Th., vol IT-19, pp. 471-480, July 1973.

L. Tolhuizen, "Discrete coding for the B.M.C., based on Schalkwijk's strategy", Proc. 6th Benelux Symp. on Inf. Th., Mierlo, The Netherlands, pp. 207-210, May 1985.

TOEPASSINGEN VAN DE GEINTEGREERDE OPTICA IN DE TELECOMMUNICATIE

drs. M.B.J. Diemeer
Dr. Neher Laboratorium PTT, Leidschendam

Applications of Integrated Optics in Telecommunications. This paper describes the applications of planar and integrated optical components in telecommunication systems based on glass fibres. These components are believed to play a major role in the economic utilization of all potentials of these systems.

Inleiding

De geïntegreerde optica is, populair gezegd, het vakgebied dat zich bezig houdt met de ontwikkeling van optische chips. Dit zijn in miniatuur uitgevoerde optische schakelingen op een vlak substraat. In deze schakelingen wordt het licht geleid in dunne transparante lagen of kanalen, die een hogere brekingsindex hebben dan hun omgeving. Het lichttransport geschiedt door totale reflectie aan de wanden van de golfgeleider op dezelfde manier als in een glasvezel.
De optische chip kan uit één enkele optische component bestaan, bijvoorbeeld een halfgeleider-laser of een planaire modulator, maar zal naarmate de fabrikagetechnologieën beter worden beheerst, in toenemende mate meerdere optische componenten bevatten. Dit kunnen actieve componenten zijn, zoals lichtbronnen, detectoren, schakelaars en modulatoren, of passieve componenten, zoals splitsers, vorken, ster- en richtkoppelingen en golflengte(dé)multiplexers. Bij het integreren worden twee wegen bewandeld. Men kan de afzonderlijke componenten realiseren met materialen die optimaal geschikt zijn voor de functie die de component moet vervullen en vervolgens de verschillende discrete planaire componenten samenvoegen. Dit is de zogenaamde "hybride integratie". De andere mogelijkheid is, dat op één substraat alle componenten worden gemaakt; dit is de "monolitische integratie". De III-V halfgeleiders galliumarsenide (GaAs) en indiumfosfide (InP) bezitten alle fysische effecten, die een monolitische integratie met bronnen, detectoren en verschillende andere actieve componenten, zoals schakelaars en modulatoren, mogelijk maken.
Optische chips vertonen veel overeenkomsten met elektronische chips. Voor de fabrikagetechnieken worden veelal dezelfde processen gebruikt om de dunne lagen (dikte: enkele micrometers) en de fijne structuren (breedte: enkele micrometers) op de substraten aan te brengen. Men maakt gebruik van sputter-, diffusie- en epitaxiale technieken om de lagen te maken en fotolithografie en etstechnieken met vloeistoffen of ionenbestraling om de structuren te definiëren. In veel gevallen zullen de geïntegreerde optische schakelingen de geïntegreerde elektronische schakelingen kunnen vervangen. Ook kunnen niet-planaire optische componenten vervangen worden door hun planaire uitvoeringen.

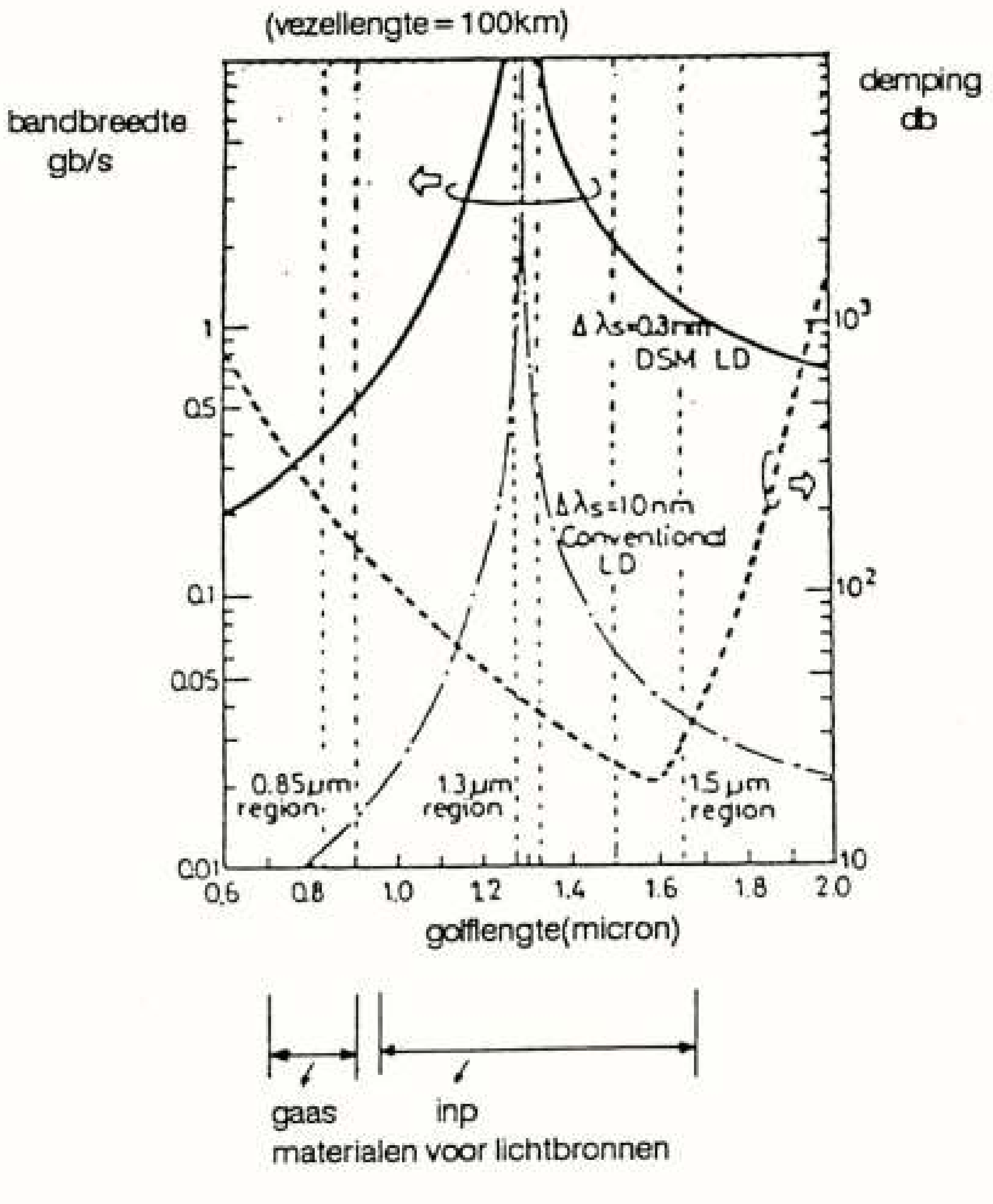
De voordelen van de geïntegreerde optische componenten ten opzichte van de elektronische zijn:
- beter compatibel met glasvezelsystemen (geen electro/optische omzettingen);

en ten opzichte van niet planaire optische componenten:
- betere prestaties (snelheid, dissipatie, schakelspanning);
- lagere kostprijs (massafabrikage);
- grotere compactheid;
- grotere betrouwbaarheid;
- grotere stabiliteit;
- betere reproduceerbaarheid.

De laatste tijd is er een ontwikkeling gaande waarbij men de specifieke voordelen van geïntegreerde elektronische- en optische schakelingen probeert te combineren door chips te maken, die zowel elektronische als optische componenten bevatten. Dit is de zogenaamde "opto-elektronische integratie". De materialen GaAs en InP zijn ook hiervoor geschikt. Elektronische IC's op basis van GaAs zijn qua snelheid superieur aan silicium (Si) IC-'s en het onderzoek op dit gebied is volop in beweging. Chips met een laser, een detector en enkele veld-effecttransistoren (FET's) zijn al gedemonstreerd. De integratiegraad van deze componenten zal zeker toenemen. De mogelijkheden van deze chips met een grootschalige integratie van optische en electronische componenten zijn nog nauwelijks te overzien. De telecommunicatie is één van de sectoren die van deze ontwikkeling zeer veel profijt zal hebben.

De glasvezel

Het belangrijkste toepassingsgebied voor geïntegreerde optische schakelingen is dat van de optische communicatie via glasvezels. De spectaculaire ontwikkeling van glasvezelsystemen heeft het onderzoek op het gebied van de geïntegreerde optica sterk gestimuleerd. Het toenemende gebruik van monomodusglasvezels vergroot de toepasbaarheid van geïntegreerde optische componenten, omdat deze componenten in de meeste gevallen uitsluitend compatibel zijn met monomodusglasvezels.
De belangrijkste eigenschappen van de conventionele (stap-index) monomodusglasvezel zijn weergegeven in figuur 1.



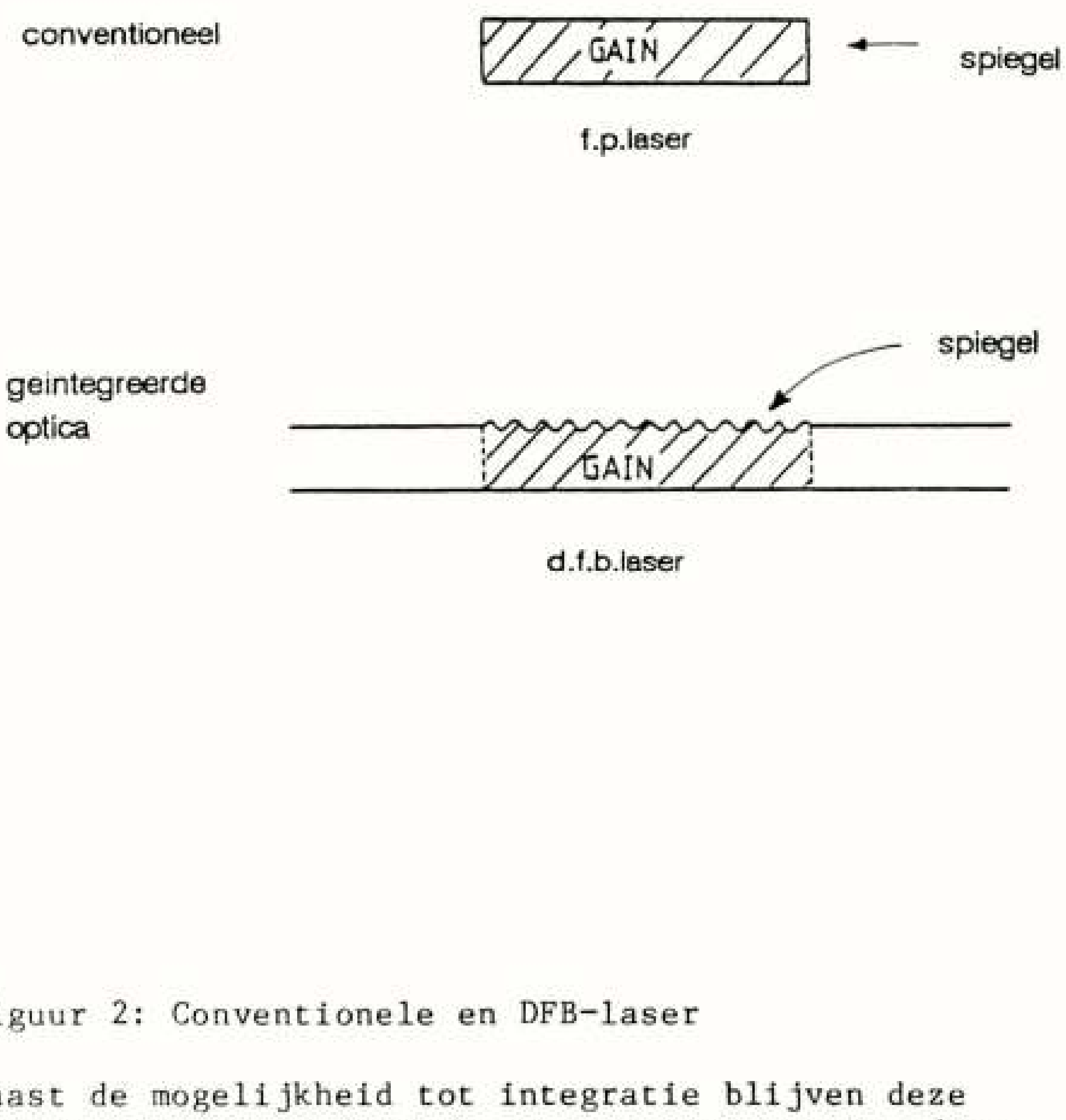
Figuur 1: Eigenschappen monomodusglasvezel

De bandbreedte in Gbit/s en de demping in dB's is gegeven als functie van de golflengte voor een vezellengte van 100 km. In het zogenaamde "korte-golflengtegebied", rond 0,85 μm, waar de demping nog relatief hoog is, kunnen lichtbronnen op basis van GaAs gebruikt worden. De eerste generatie glasvezelsystemen werkte in dit golflengtegebied. De volgende generaties glasvezelsystemen werken in het zogenaamde "lange-golflengtegebied" dat van 1,2 μm tot 1,7 μm loopt. Hier worden InP-lichtbronnen gebruikt. Rond 1,3 μm is de dispersie in de vezel minimaal en de bandbreedte maximaal. Rond 1,5 μm is de demping minimaal.
De dispersie wordt bepaald door de lijnbreedte van de laser onder hoge modulatiefrequenties. Uit de figuur valt op te maken dat een grote bandbreedte beschikbaar is bij gebruik van een "dynamic single mode" (DSM)-laser. Deze lasers blijven bij hoge modulatiefrequenties in een stabiele modus licht uitzenden; de lijnbreedte is ongeveer 0,3 nm. De conventionele laserdiode heeft onder snelle modulatie een lijnbreedte van 10 nm.
De laatste ontwikkeling op glasvezelgebied is de "dispersion shifted" glasvezel. Dit is een vezel waarbij het dispersieminimum naar het dempingsminimum is verschoven. Ook heeft men de "dispersion broadened" vezel ontwikkeld: bij deze vezel is de dispersie over een breder golflengtegebied laag. Tenslotte worden er polarisatie-behoudende vezels gemaakt. De polarisatietoestand van het ingekoppelde licht blijft hierin behouden. Deze vezels zijn belangrijk als ze gebruikt worden in combinatie met geïntegreerde optische componenten, omdat de meeste componenten slechts voor één polarisatietoestand van het ingekoppelde licht goed werken.

In figuur 1 is te zien dat de glasvezel in staat is om over grote afstanden signalen met een grote bandbreedte te transporteren. Tot op heden wordt deze capaciteit maar ten dele benut. Geïntegreerde optische componenten bieden echter de mogelijkheid om op economische wijze deze capaciteit ten volle te benutten.

Lasers

Bij de conventionele laserdiode wordt het kristal gekliefd om de spiegels te vormen. Daardoor is het onmogelijk geworden om nog een monolitische integratie met andere componenten uit te voeren.
Dit is wel mogelijk met de lasers die uit de geïntegreerde optica stammen. De spiegels worden daar gevormd door periodieke verstoringen in de vorm van groeven (tralies) die op de golfgeleider worden aangebracht, zoals in de "distributed feedback" (DFB) laser (figuur 2).

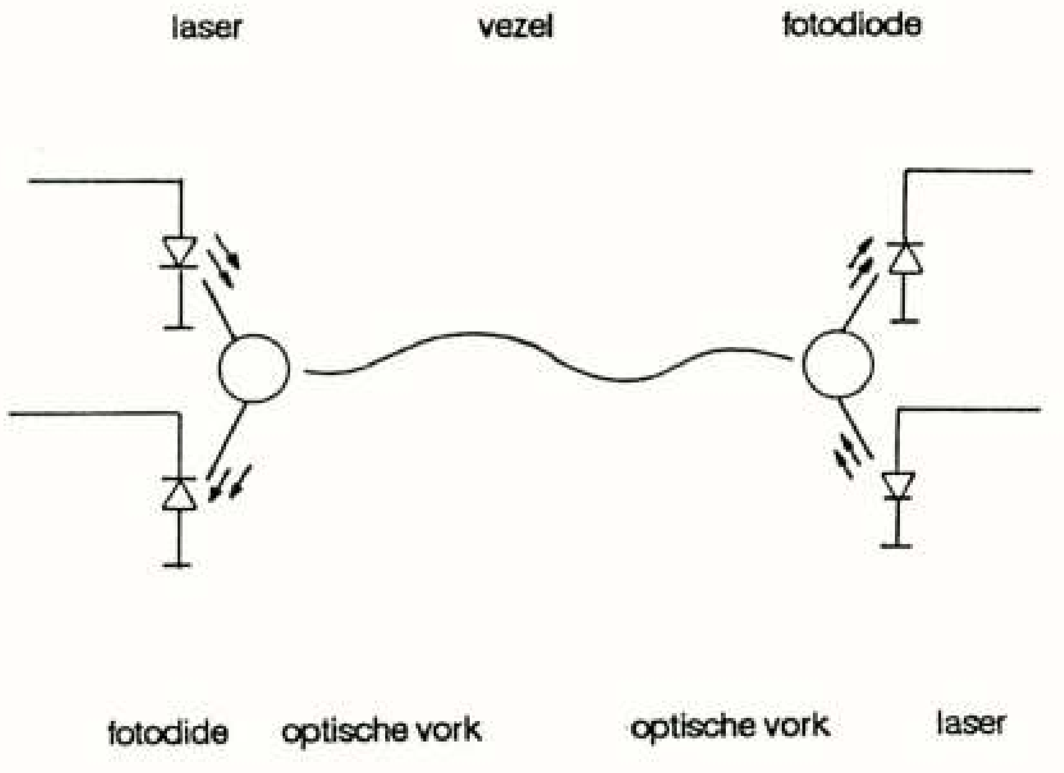


Figuur 2: Conventionele en DFB-laser

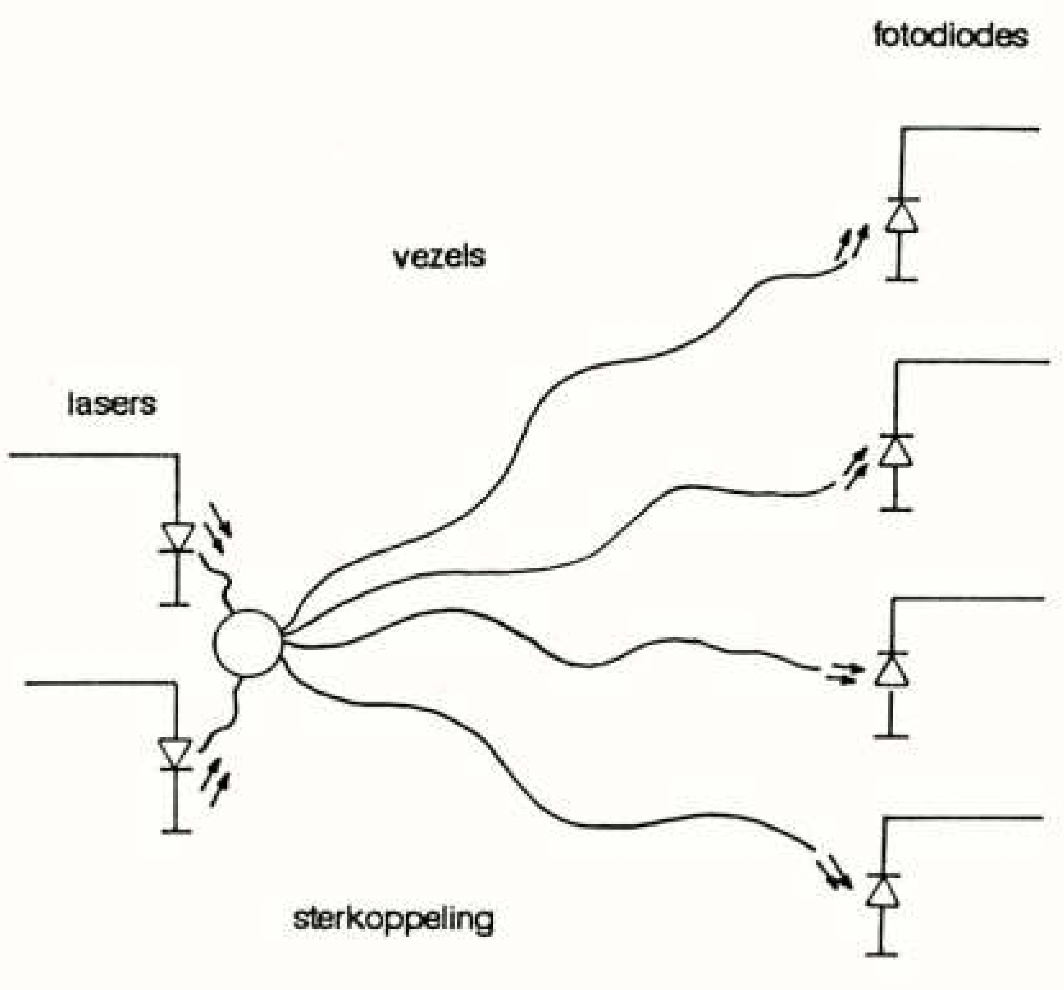
Naast de mogelijkheid tot integratie blijven deze lasers onder hoge modulatiefrequenties stabiel (DSM-laser).

Passieve componenten

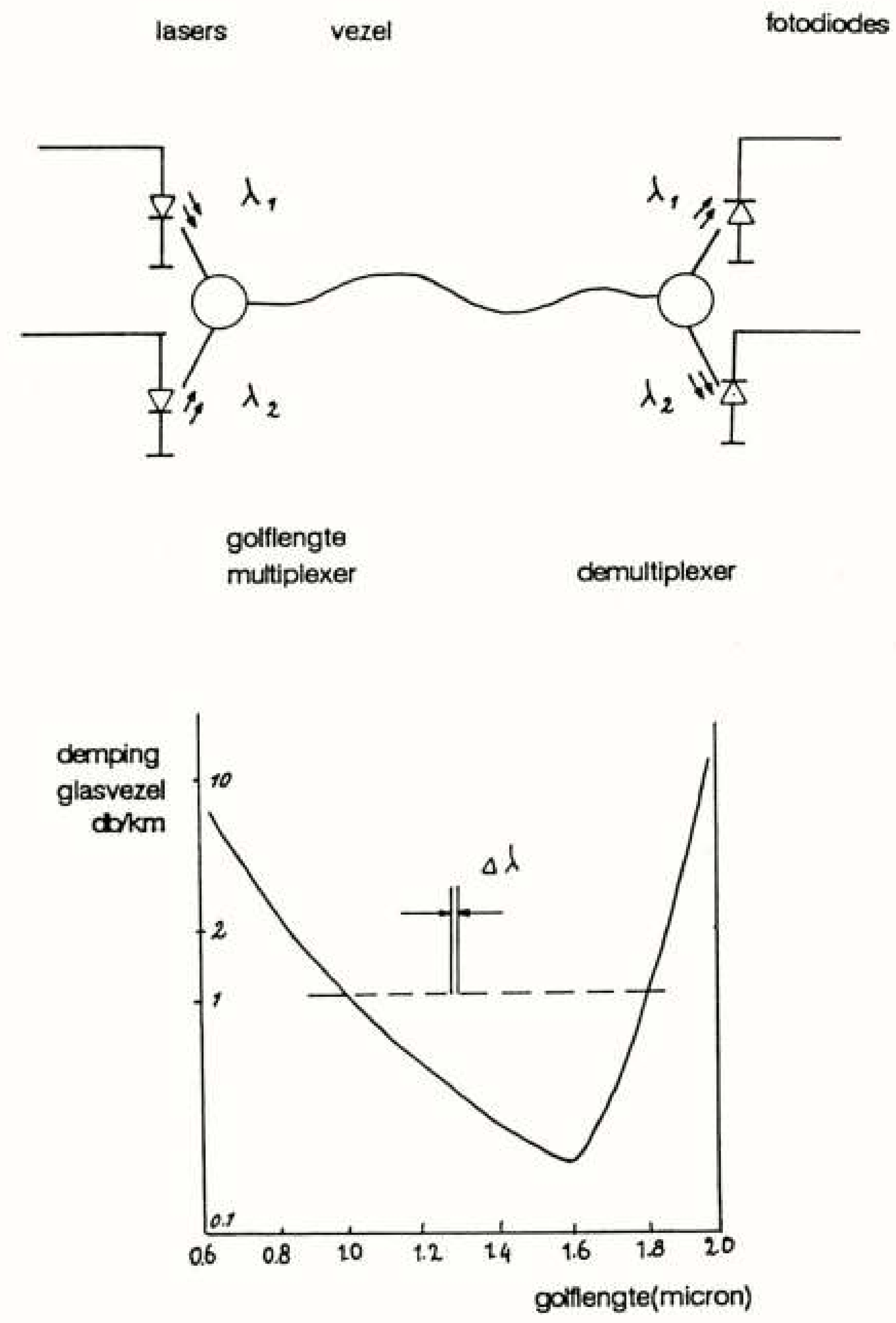
Passieve componenten zijn componenten waarbij het licht uitwendig niet te beïnvloeden is. Tot de passieve componenten behoren de aftap, de splitser, de passieve richtkoppeling (Eng.: directional coupler) de sterkoppeling, de optische vork en de golflengte(dé) multiplexer. Voorbeelden van systemen waarin passieve componenten worden gebruikt, worden in figuur 3, 4 en 5 getoond.



Figuur 3: Twee-wegverkeer met optische vork

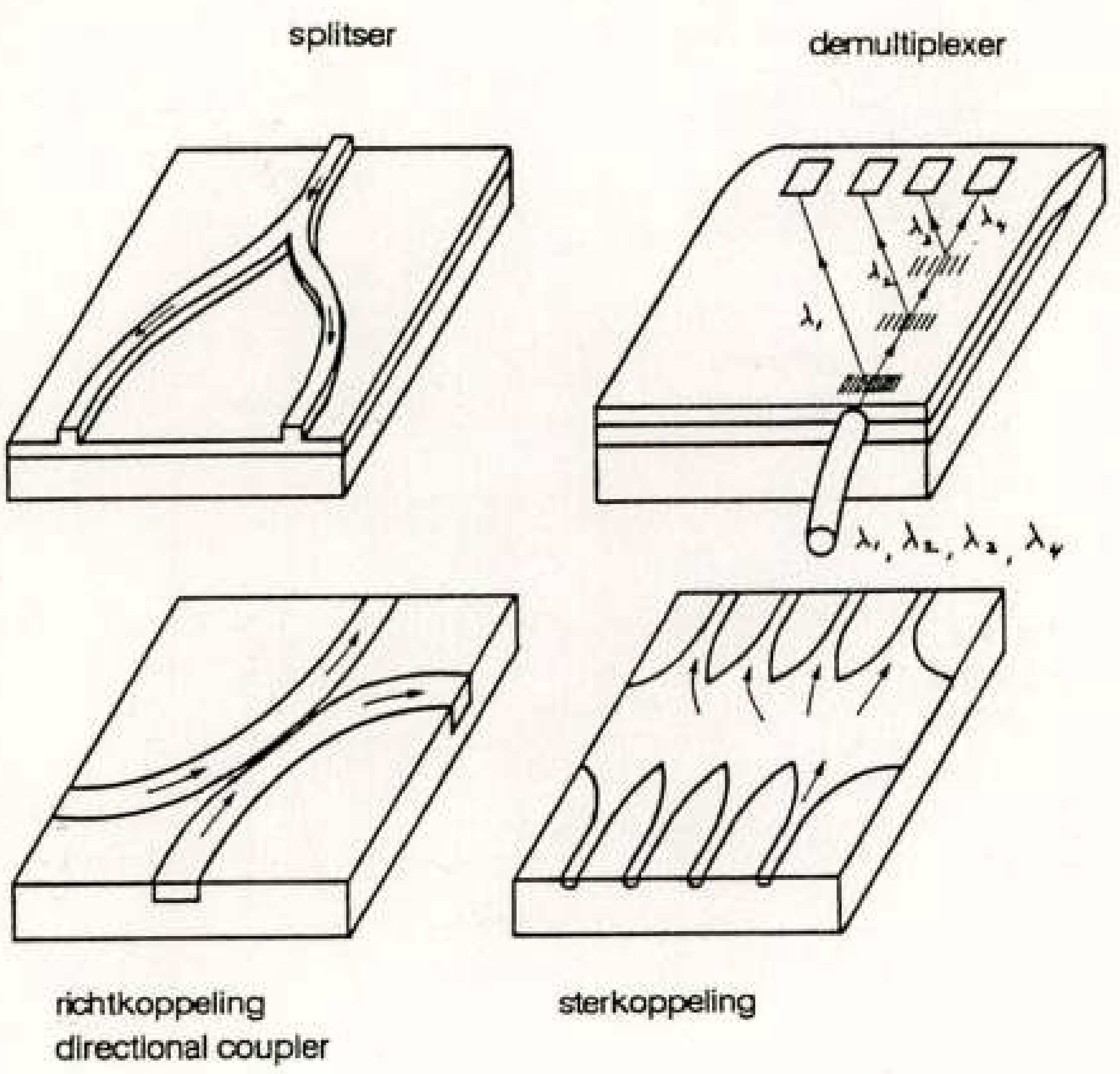


Figuur 4: Distributie met sterkoppeling

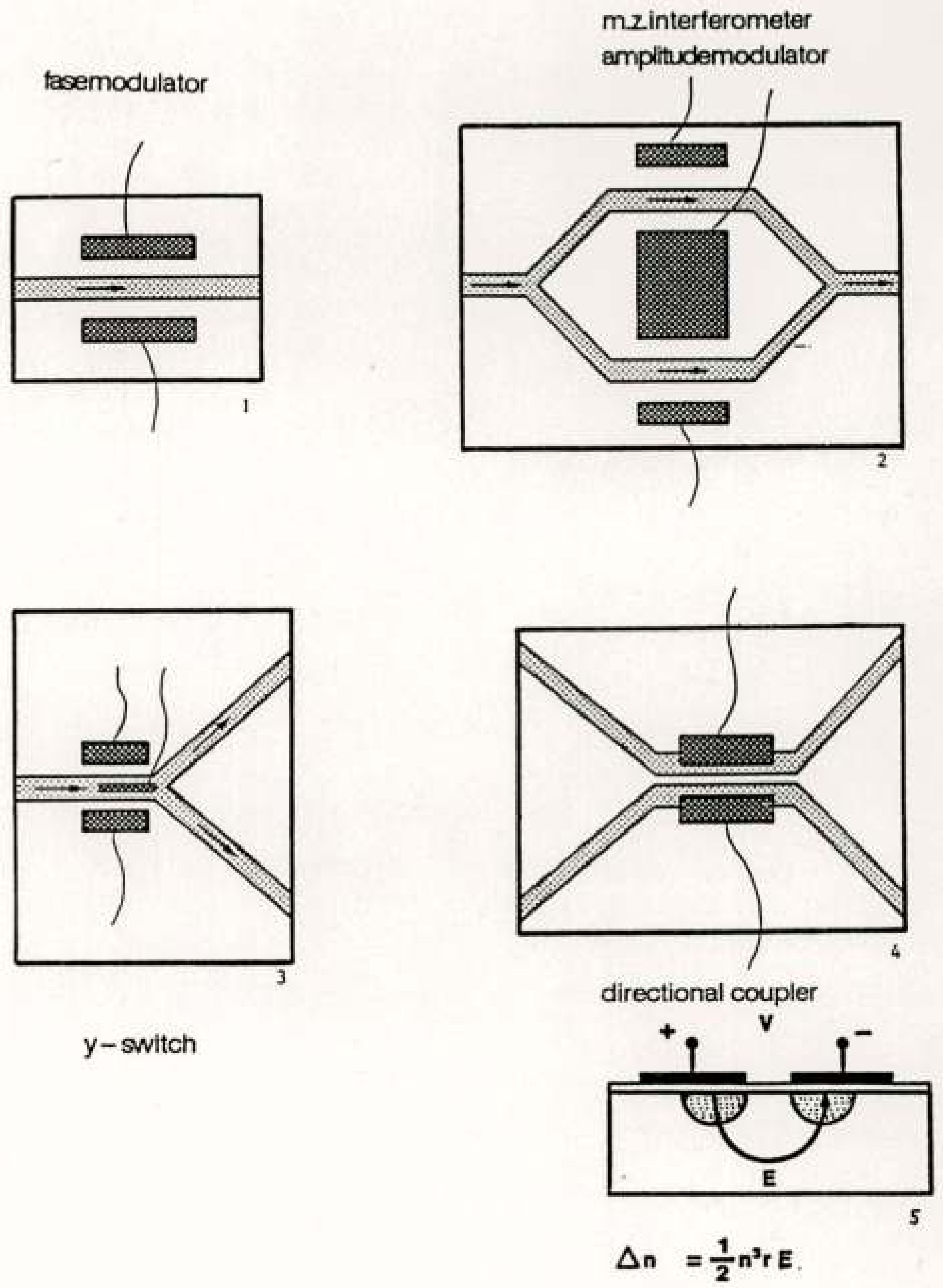


Figuur 5: Golflengtemultiplex

Met een optische vork (fig. 3) kunnen heengaande en teruggaande optische signalen gescheiden worden, waardoor twee-wegverkeer over één glasvezel mogelijk is. Sterkoppelingen worden gebruikt in glasvezelnetwerken met een stervormige structuur. Dan kan bijvoorbeeld een video-signaal van één van de zenders over meerdere ontvangers gedistribueerd worden (fig. 4).
Omdat de demping van de glasvezel over een golflengtegebied laag is, kunnen tegelijkertijd signalen met verschillende kleuren licht over de glasvezel gezonden worden. Men gebruikt daarvoor golflengtemultiplexers (bij de zender) en démultiplexers (bij de ontvanger) (fig. 5). Met deze techniek kan men maximaal enkele tientallen extra kanalen creëren.
De passieve componenten die tot op heden in glasvezelsystemen worden toegepast, bestaan uit bewerkte glasvezels of zijn opgebouwd uit kleine lenzen, prisma's en tralies (micro-optiek). Beide methoden zijn arbeidsintensief, de componenten zijn dan ook kostbaar. Omdat het toepassingsgebied van de passieve componenten vooral liggen op het lokale netvlak en in lokale netwerken (LAN's) waar grote aantallen componenten met een lage kostprijs gewenst zijn, kan de geïntegreerde optica een aantrekkelijk alternatief vormen.
Enige voorbeelden van passieve planaire componenten worden getoond in figuur 6.



Figuur 6: Passieve planaire componenten



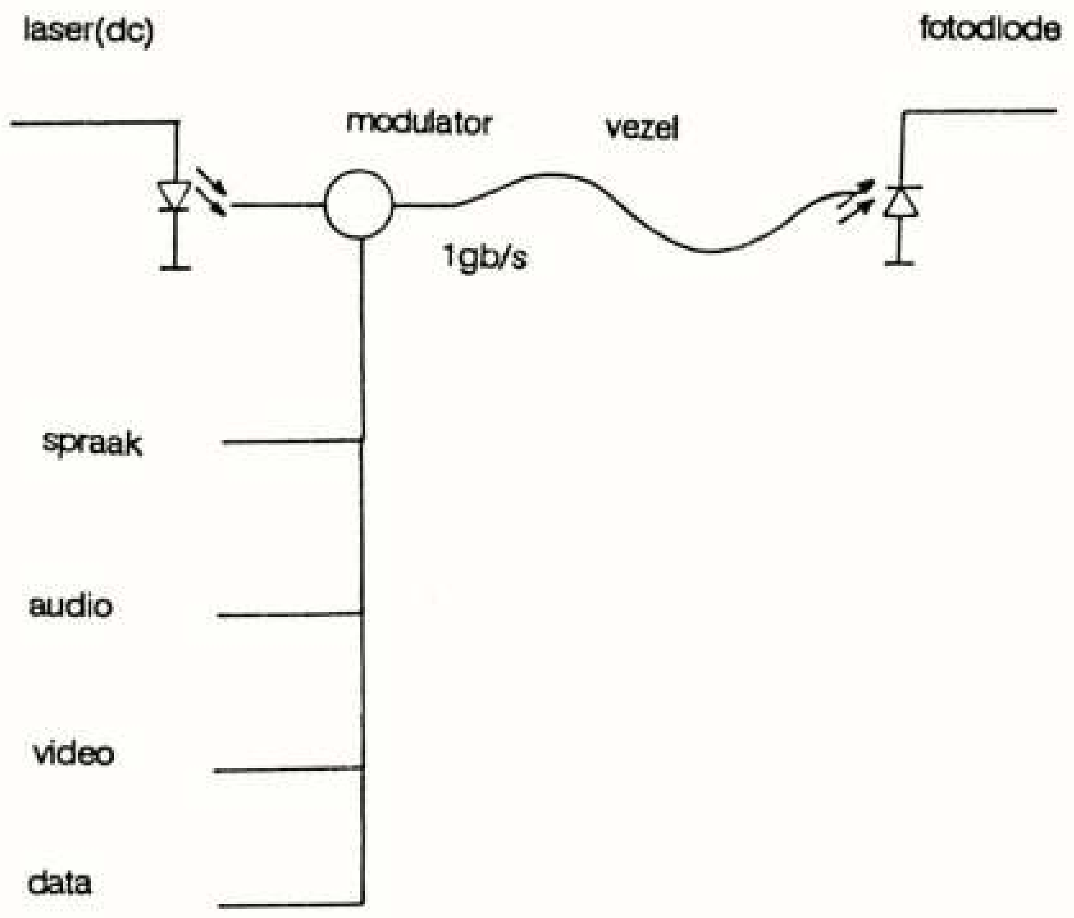
Figuur 7: Planaire elektro-optische schakelaars en modulatoren

Actieve componenten: schakelaars en modulatoren

Actieve componenten zijn componenten waarbij men uitwendig het optische signaal kan beïnvloeden. In bijna alle gevallen geschiedt deze beïnvloeding via een elektrisch signaal. Schakelaars en modulatoren zijn, naast de bronnen en detectoren, de belangrijkste actieve componenten in de telecommunicatie. Er zijn verschillende fysische effecten, waarmee een optische schakelwerking of modulatie kan worden verkregen. In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van een verandering van de brekingsindex in het materiaal van de golfgeleider onder invloed van een elektrisch veld: het elektro-optische effect.
In een aantal materialen met een elektro-optisch effect is het mogelijk om optische golfgeleiders te maken. Het bekendste materiaal is lithiumniobaat ($LiNbO_3$). De golfgeleidende kanalen kunnen door diffusie van titaan gemaakt worden. De III-V halfgeleiders InP en GaAs vertonen een minder sterke elektro-optische werking dan $LiNbO_3$, maar de mogelijkheden voor een monolitische integratie van optische en electronische componenten verklaart de grote belangstelling voor deze materialen. Op deze substraten worden met epitaxiale technieken kristallijne lagen voor de golfgeleiders gemaakt. Van wat recentere datum is de belangstelling voor elektro-optische polymeren. Men heeft theoretisch zeer hoge elektro-optische coëfficiënten voor deze materialen kunnen vaststellen. Dit gegeven, gecombineerd met hun gemakkelijke verwerkbaarheid (o.a. met opspinnen kan men golfgeleidende lagen op verschillende substraten maken), maakt deze polymeren tot een zeer interessant materiaal voor planaire schakelaars en modulatoren.
Een aantal uitvoeringsvormen van schakelaars en modulatoren is in figuur 7 te zien.

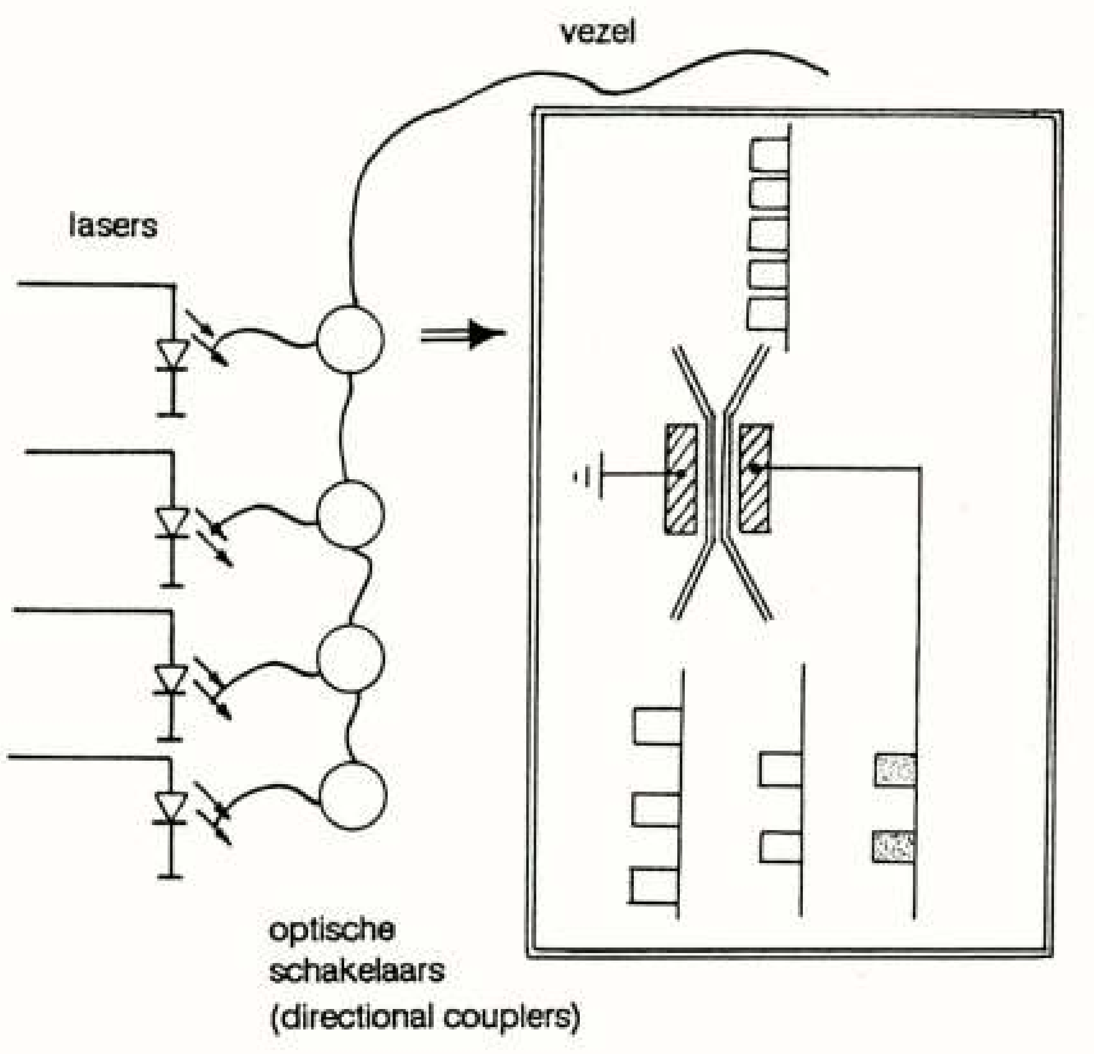
Het elektro-optische effect wordt opgewekt door een spanning te zetten op opgedampte elektroden die zich in de nabijheid van de golfgeleidende kanalen bevinden. De brekingsindexverandering Δ n in de golfgeleiders is evenredig met de sterkte van het elektrische veld (E) en de elektro-optische coëfficiënt (r) (figuur 7.5). Op deze manier kan in een rechte golfgeleider een fasemodulatie opgewekt worden (fig. 7.1). Een amplitudo-modulatie kan gerealiseerd worden met een planaire Mach Zehnder interferometer (fig. 7.2). Een faseverschil tussen de twee takken van de interferometer zorgt ervoor dat bij de samenvoeging een modus wordt gecreëerd, die niet kan propageren. Het licht zal dan uit de golfgeleider stralen. Met de y-switch (fig. 7.3) en de directional coupler (fig. 7.4) kan ruimtelijk geschakeld worden.
In de y-switch kan door bekrachtiging van de elektroden een brekingsindexprofiel gemaakt worden, dat ervoor zorgt dat het licht in één van de twee uitgaande kanalen wordt gestuurd. In de directional coupler zijn twee golfgeleiders over een zekere lengte (de interactie-lengte) zeer dicht bij elkaar gebracht. Staat er geen spanning op de elektroden, dan kan licht van één van de ingaande kanalen in het interactiegebied volledig naar het naastliggende kanaal lekken. Door bekrachtiging van de elektroden wordt deze koppeling verstoord en blijft het licht in hetzelfde kanaal.
Bij deze componenten zijn het vooral de prestaties die hen interessant maken voor toepassingen in de telecommunicatie. Die prestaties hebben betrekking op een lage schakelspanning (typisch enkele volts), een hoge schakelsnelheid (meer dan 10 GHz is mogelijk) en een lage vermogendissipatie. Ook kan het vermijden van elektro-optische omzettingen een reden zijn om optische schakelaars toe te passen.

De concurrentie van de elektronische schakelaars is echter groot vanwege de verregaande integratiegraad van de elektronische componenten. Er is naast de schakelfunctie nog een zeer breed scala van functies (opslag, bewerking) in de vorm van elektronische IC's ontwikkeld. De optische integratie staat nog in de kinderschoenen; optische geheugens, bijvoorbeeld, zijn nog nauwelijks ontwikkeld.
Een planaire intensiteitsmodulator kan gebruikt worden zoals in figuur 8 is weergegeven.



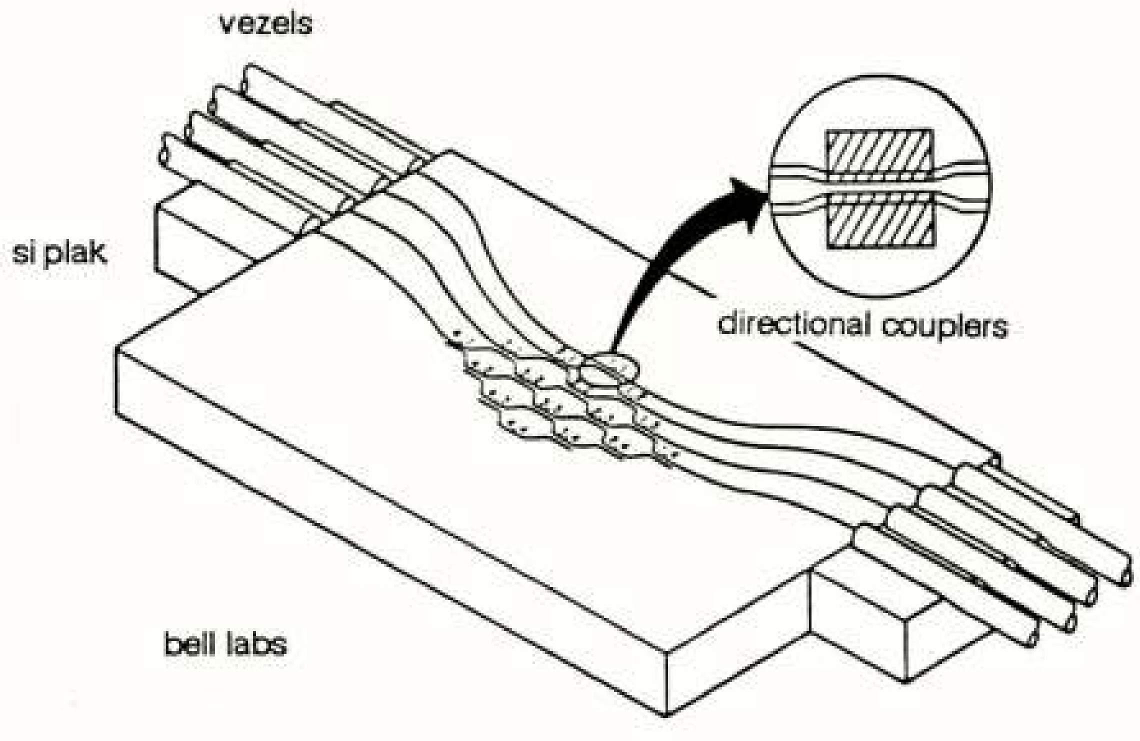
Figuur 8: Elektronische multiplex, externe modulator

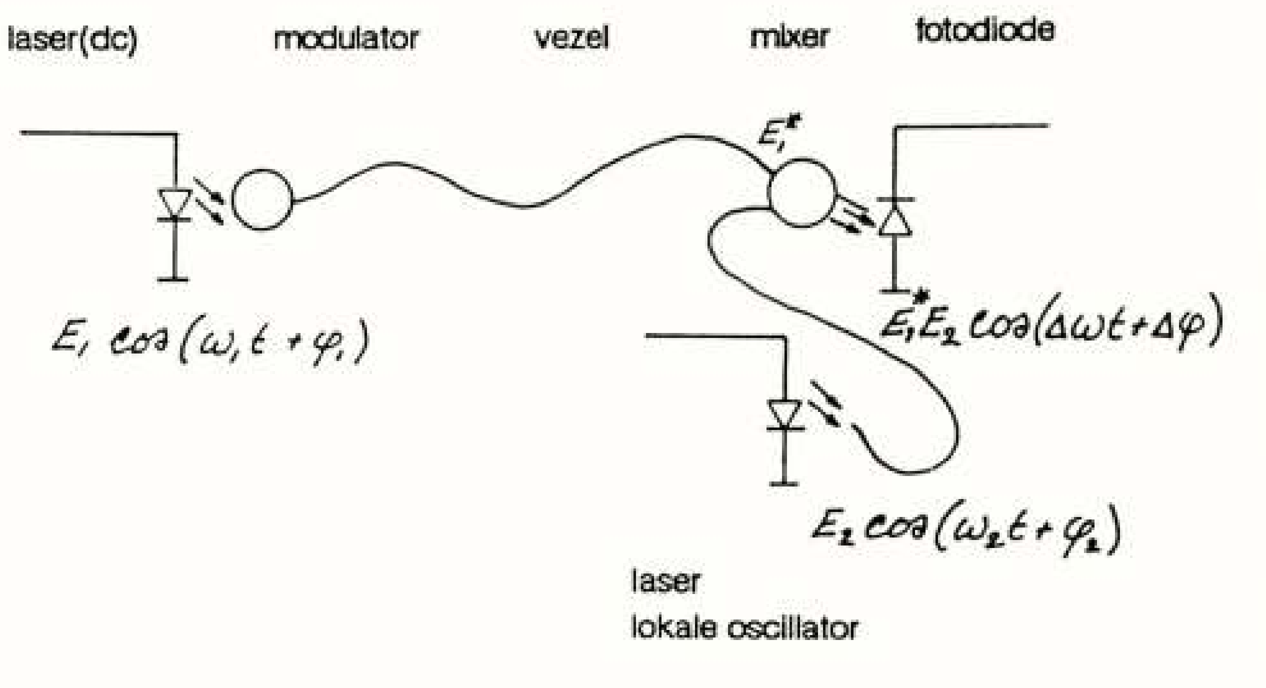
Een (conventionele) halfgeleider laser werkt in een stabiele continue modus. Daardoor blijft de lijnbreedte van de laser smal en kan in het lange golflengtegebied meer dan 1 Gbit/sec over 100 km getransporteerd worden (zie fig. 1). Het 1 Gbit/sec signaal kan uit electronisch gemultiplexte spraak, audio, video of data kanalen bestaan. De externe planaire modulator kan een $LiNbO_3$ component zijn. Sinds kort zijn deze componenten commercieel verkrijgbaar. De modulatie-bandbreedte is enkele GHz. Een alternatieve methode is in figuur 9 geschetst.



Figuur 9: Optische multiplex, externe modulatoren

Hier worden de verschillende signalen optisch gemultiplext met directional couplers, die aan de doorgaande bitstroom bits kunnen toevoegen zoals in de figuur is weergegeven. Als het optische vermogensbudget geen beperkende factor vormt, dan kan ook één laser met een (planaire) splitser toegepast worden. De laser, splitser en directional couplers kunnen dan op één substraat geïntegreerd worden.
Een integratie van verschillende directional couplers tot een schakelmatrix is in figuur 10 te zien.





Figuur 10: Optische schakelmatrix

4 x 4 en 8 x 8 met niet-blokkerende matrices bestaande uit directional couplers op een $LiNbO_3$ substraat zijn al gerealiseerd, onder andere bij Bell Labs in de V.S. De monomodusglasvezels worden met behulp van Si-plakken met anisotroop geëtste groeven tegen de $LiNbO_3$ chip gelijmd. De matrix kan zonder elektro-optische omzettingen allerlei zeer breedbandige optische signalen van één van de ingangen naar één van de uitgangen schakelen.
Naast de schakelaars en modulatoren zijn er nog verschillende andere planaire elektro-optische componenten die in glasvezelsystemen toegepast kunnen worden, zoals frequentieverschuivers en polarisatiedraaiers. Deze componenten en de planaire modulatoren blijken vooral in coherente systemen toegepast te kunnen worden.

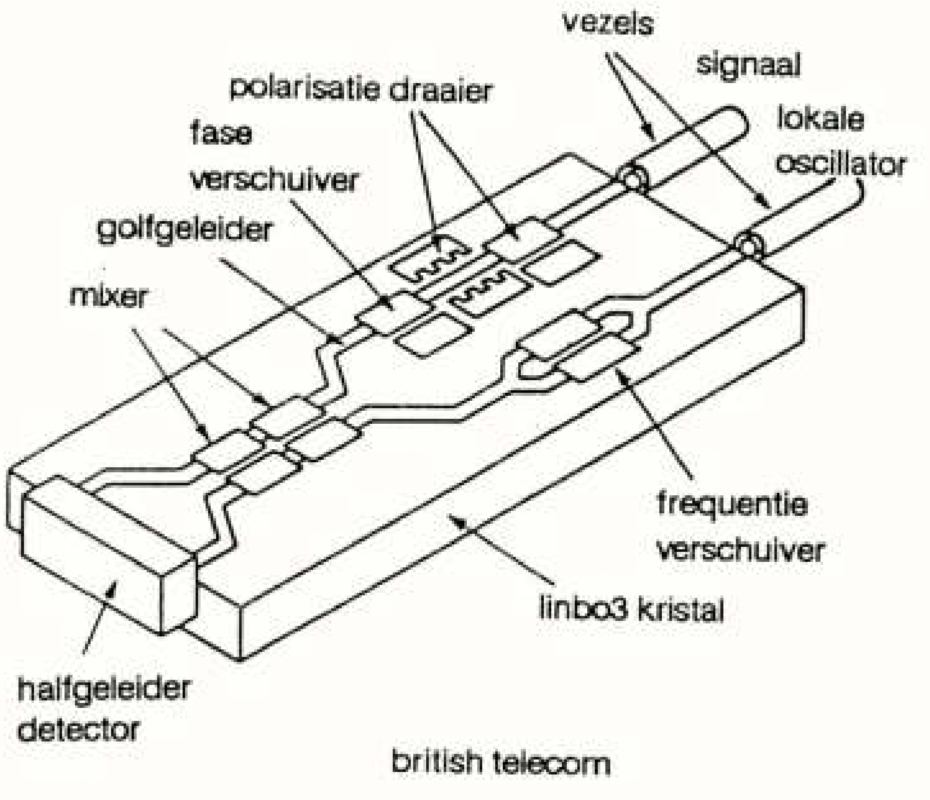
Coherente systemen

De optische communicatie via glasvezels maakt dezelfde ontwikkeling door als de radio-communicatie.
De huidige glasvezelsystemen lijken op de eerste generatie radio-communicatiesystemen, waarbij men directe detectie toepaste. De volgende generatie zal van het heterodyne detectieprincipe gebruik gaan maken. Op dit moment wordt in veel laboratoria onderzoek verricht naar heterodyne of coherente systemen. Het principe wordt getoond in figuur 11.

Figuur 11: Coherente detectie

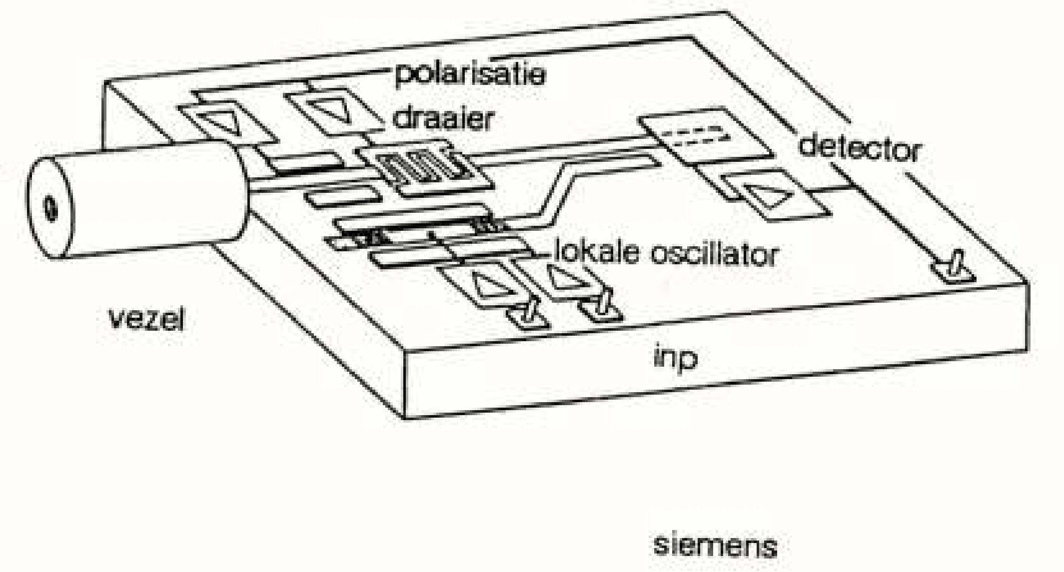
Het (extern) gemoduleerde lasersignaal van de zender wordt bij de ontvanger gemengd met dat van de zogenaamde lokale oscillator. Dit is een laser met een frequentie die iets verschilt van de zenderfrequentie. De fotostroom van de fotodiode heeft een frequentie die het verschil is van de zender en de lokale oscillatorfrequentie. Dit signaal kan gefilterd, versterkt, gedemoduleerd en geregenereerd worden met bekende elektronische methodes, omdat de verschilfrequentie oHz (homodyne) tot enkele GHz kan zijn. De amplitudo van de fotostroom is evenredig met het produkt van beide optische signalen. Het grote voordeel van de coherente detectie is een verbetering van de ontvangergevoeligheid met 10 à 20 dB, waardoor het mogelijk wordt om zeer grote afstanden (> 100 km) repeater-loos te overbruggen. Een tweede voordeel is dat het mogelijk is optische signalen met frequenties die zeer dicht bij elkaar liggen (enkele GHz) te multiplexen. Dit kan omdat van elektrische filters gebruik gemaakt kan worden. Het aantal draaggolven dat men dan in het lange golflengtegebied over één vezel kan verzenden is vele orden groter dan met de conventionele golflengte-multiplex (zie fig. 5).
Omdat men gebruik maakt van de coherente eigenschappen van de draaggolf (licht), kan men nu amplitudo-, frequentie- of fasemodulatie toepassen. Hiervoor kunnen planaire optische componenten gebruikt worden (zie fig. 7). Een groot probleem in coherente systemen is de stabiliteit van de lasers; een relatief kleine verschuiving van de draaggolffrequentie ($\sim 10^{14}$Hz) geeft een relatief grote verschuiving van de verschilfrequentie ($0-10^9$Hz). Daarom worden continu werkende lasers met externe planaire modulatoren en lasers met traliespiegels (zie fig.2) toegepast.

Bij de ontvanger kan de planaire optische technologie volledig tot zijn recht komen. Figuur 12 laat zien hoe volgens onderzoekers van British Telecom een dergelijke ontvanger op basis van $LiNbO_3$ eruit kan zien.



Figuur 12: Coherente optische ontvanger van $LiNbO_3$

De chip bevat een polarisatiedraaier, een Mach Zehnder frequentieverschuiver en een directional coupler voor de menging van de optische signalen. De lokale oscillator is met een glasvezel aan de chip verbonden. De halfgeleider-fotodiode is op hybride wijze geïntegreerd. Een monolitisch geïntegreerde uitvoering van deze ontvanger kan de vorm hebben zoals die in figuur 13 is geschetst (Siemens).



Figuur 13: Coherente optische ontvanger van InP

Op het InP substraat bevinden zich nu ook de lokale oscillator (een tralielaser) en de fotodetector.

In de praktijk zijn deze ontvangers nog niet gerealiseerd. De $LiNbO_3$ component zal binnen afzienbare tijd ontwikkeld kunnen worden. Het zal echter nog enige jaren duren voordat de monolitische ontvanger gerealiseerd zal worden, omdat pas sinds kort betrouwbare lasers gemaakt kunnen worden.

<u>Onderzoek in het DNL</u>

In het dr. Neher Laboratorium van de PTT wordt sinds enkele jaren onderzoek verricht op het gebied van geïntegreerde optische componenten. Het onderzoek heeft twee hoofdrichtingen, namelijk de technologie en de theorie (zie artikel ir. N.H.G. Baken in dit blad). Voor het technologisch onderzoek heeft men de beschikking over een stofarme ruimte van ruim 100 m^2. In deze ruimte bevinden zich een kamer voor de fotolithografie, een kamer voor de depositie van lagen (opdampsystemen, sputterinstallatie, bundeletser, diffusieovens) en een kamer voor de karakterisatie van de planaire componenten (laagdikte, brekingsindexprofiel, demping etc).
Passieve componenten worden met het ionenuitwisselingsproces in glas gemaakt. Door een goede beheersing van dit proces kunnen componenten met lage tussenschakeldemping gerealiseerd worden.
Op het gebied van de actieve componenten wordt gewerkt met $LiNbO_3$ en elektro-optische polymeren. In de nabije toekomst zal in samenwerking met de Technische Universiteit Delft (vakgroep Microgolftechniek en Optica) ook aan InP componenten gewerkt worden.

De schakelaars op basis van polymeren worden in RACE-verband onderzocht. Het RACE-programma (Research in Advanced Communication Technology for Europe) vloeit voort uit een plan van de EEG om in de negentiger jaren breedbandige optische communicatie in heel Europa mogelijk te maken. Verschillende onderzoeksprojecten in de vorm van samenwerkingsverbanden tussen partners in verschillende Europese landen moeten bijdragen aan de totstandkoming van dit plan.
Optische schakelaars op basis van polymeren is één van de projecten. AKZO ontwikkelt het polymeer en naast het DNL zijn nog bedrijven en instituten uit België en het Verenigd Koninkrijk betrokken bij dit project.
In RACE is een belangrijke plaats ingeruimd voor geïntegreerde optica en coherente systemen. Dit zal ertoe bijdragen dat de introductie van geïntegreerde componenten in glasvezelsystemen niet lang meer op zich zal laten wachten.

Voordracht gehouden tijdens de 344e werkvergadering.

THEORETICAL AND DESIGN ASPECTS IN INTEGRATED OPTICS, NEW PERSPECTIVES IN OPTICAL TELECOMMUNICATION SYSTEMS

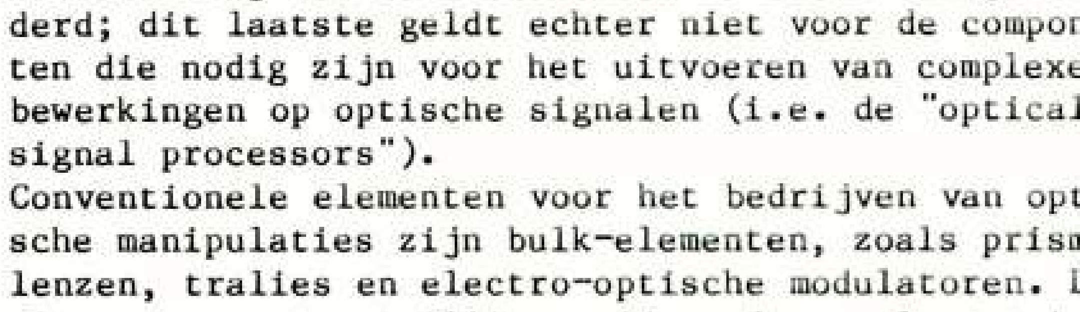
ir. N.H.G. Baken
department of fibers and integrated optics Dutch PTT, dr Neher Laboratories

Theoretical and design aspects in integrated optics; new perspectives in optical telecommunication systems. Integrated optics is a new discipline that will play a major role especially in the development of optical telecommunication systems. Essential advantages offered through Integrated Optics are high switching speeds (above 56 bit/s), inherent simplicity of all optical systems composed with optical fibers and integrated optical microcircuits, high reliability of these circuits and low costs through mass production. This article gives a concise introduction in integrated optics; theoretical and design aspects are highlighted. Firstly planar structures, forming the basic configurations for Integrated Optical Circuits, are treated. Consequently an exposition of twodimensional structures, necessary as building blocks for Integrated Optical components, is presented. Finally the operation of a relevant component, the directional coupler, is explained through a coupled mode approach. Furthermore some attention is given to the tight cooperation between theoretical and technical research in integrated optics at the doctor Neher Laboratories, and some lines for further research are set out; the latter partly being defined through international cooperation in the EEC Research on Advanced Communication in Europe projects, the national programs with the Dutch Technical University of Delft and national industries.

Inleiding

Bij elke vorm van communicatie zijn steeds drie basisingrediënten vereist: de bron (signaalgenerator), het transmissiemedium (signaaldrager) en de ontvanger (signaaldetector). In de hedendaagse optische communicatiesystemen zijn deze drie elementen respectievelijk de halfgeleiderlaser, de glasvezel en de fotodiode. De ontwikkeling van deze elementen is reeds ver gevorderd; dit laatste geldt echter niet voor de componenten die nodig zijn voor het uitvoeren van complexe bewerkingen op optische signalen (i.e. de "optical signal processors").
Conventionele elementen voor het bedrijven van optische manipulaties zijn bulk-elementen, zoals prisma's, lenzen, tralies en electro-optische modulatoren. Deze elementen moeten trillingsvrij worden geplaatst in een relatief erg grote opstelling. Voor praktische doeleinden buiten het laboratorium is zo'n opstelling niet geschikt, en bovendien te kostbaar. Een alternatief is om het optische signaal voor de bewerking om te zetten in een electrisch signaal, dat via een "Electronic Integrated Circuit" kan worden gemanipuleerd. Vervolgens moet dit bewerkte electrische signaal dan weer in een optisch signaal worden omgezet voor verder transport via de glasvezel(s) (figuur 1).

Duidelijk is dat die twee conversies deze optie niet aantrekkelijk maken. Een oplossing ligt voor de hand: maak een Optical Integrated Circuit (OIC), waarbij alle bewerkingen binnen het optische domein blijven. Dit is nu precies de hoofddoelstelling van de geïntegreerde optica: het integreren van één of meer optische componenten op één optisch substraat. Deze componenten zijn de alternatieven van de genoemde bulkelementen.



Figuur 1: Voor de bewerking van optische signalen zijn met EIC twee conversies, met OIC geen conversies nodig.

In de volgende twee hoofdstukken komen respectievelijk de planaire structuren (die het uitgangspunt voor de OIC's vormen) en de tweedimensionale golfleiders (welke de bouwstenen voor geïntegreerd optische componenten zijn) aan de orde. Achtereenvolgens wordt voor deze structuren een uiteenzetting gegeven van de configuratie, het mathematische model en het bijbehorende computerprogramma.

Planaire structuren

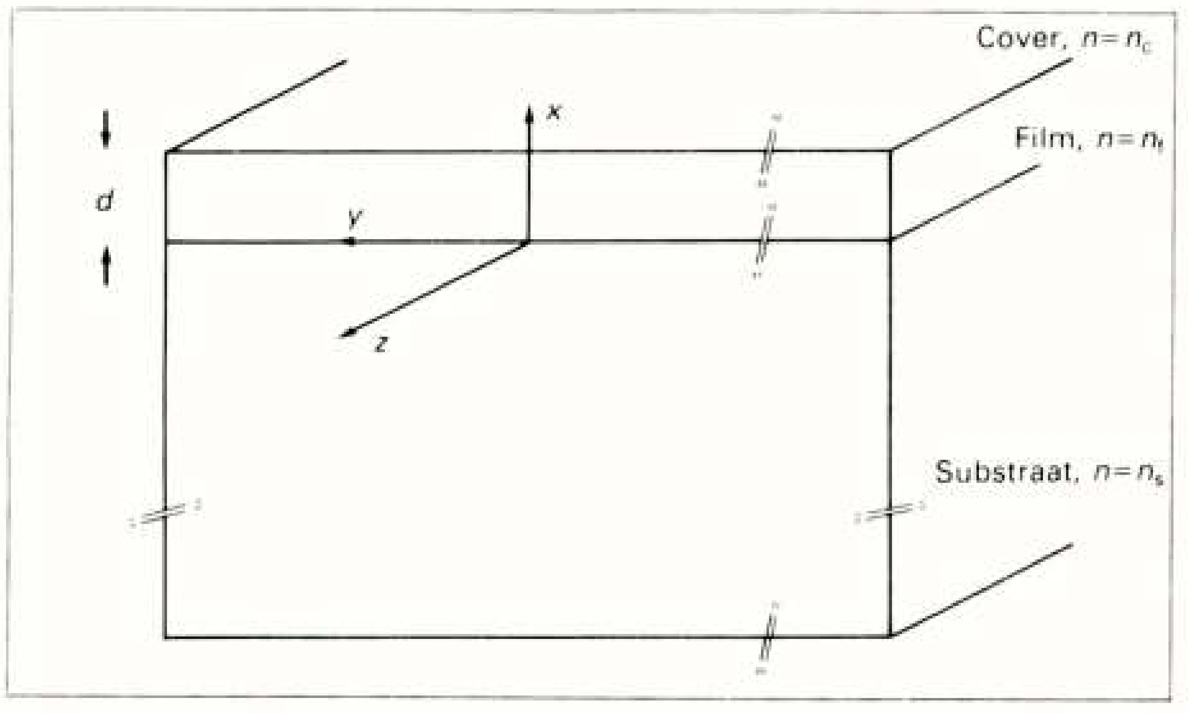
De basis voor een OIC is een optisch substraat, met een karakteristiek oppervlak van enige tientallen vierkante millimeters tot enkele vierkante centimeters, en een dikte van enkele millimeters. Dit substraat kan bijvoorbeeld een microscoopglaasje zijn. Hierop wordt een uiterst dunne diëlectrische laag, de filmlaag, aangebracht. De dikte van de film varieert, afhankelijk van de toepassing en gebruikte technologie, van 1 tot 50 micron.
Een filmlaag kan ook in het substraat ontstaan door een diffusieproces aan het substraat-oppervlak. De brekingsindex n_f van de film is doorgaans in de orde van 1 percent groter dan de brekingsindex n_s van het substraat; hierdoor kan de film het licht dat er in is gekoppeld als het ware vasthouden. Eventueel wordt op de film nog een deklaag (ook wel cover of substraat genoemd) aangebracht. De brekingsindex n_c van deze deklaag is in het algemeen veel kleiner dan n_s:

$$1 \leq n_c < < n_s < n_f$$

Als er geen deklaag is, dan fungeert de lucht boven het OIC als superstaat, en geldt:

$$n_c = 1$$

De basisstructuur voor het OIC is dus een vlakke diëlectrische golfgeleider (figuur 2). In of op de film kunnen de componenten worden gemaakt. De materiaalkeuze van het substraat legt evenwel direct beperkingen op aan de types van componenten die kunnen worden geïntegreerd op het OIC. Zo moet voor de integratie van een halfgeleiderlaser het substraat eveneens een halfgeleidermateriaal zijn; als voor het substraat glas is gekozen, dan komen uitsluitend passieve componenten in aanmerking (dat zijn componenten met een tijdsvariante functie).

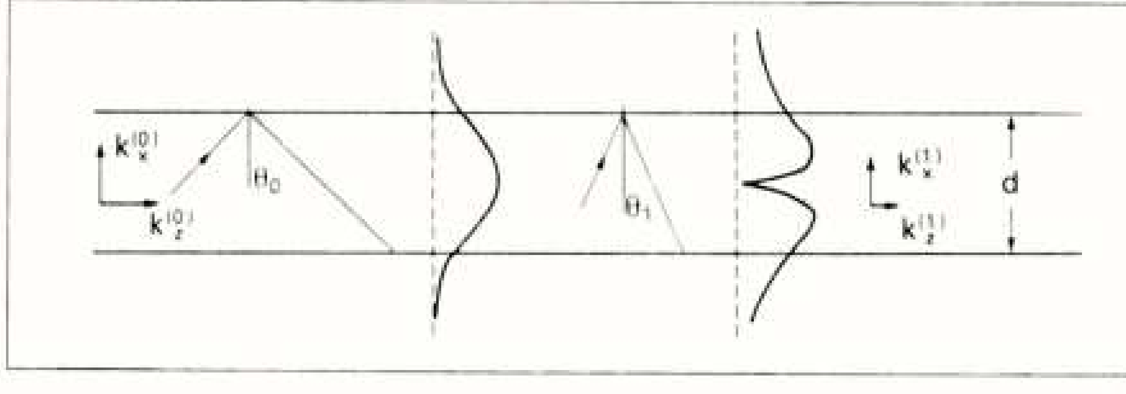


Figuur 2: Planaire golfgeleider (plak met dunne film)

De planaire golfgeleider die het uitgangspunt vormt voor een OIC bestaat, zoals gezegd, uit drie discrete lagen: substraat, film en superstraat. Licht dat vanuit de kern van een glasvezel inkoppelt in de film, kan door de hoge brekingsindex van de film niet, of nauwelijks weglekken naar het substraat of het superstraat. Voor het ontwerp van een OIC is het van belang te weten hoe het licht zich voortplant in de film; hiervoor moeten de voortplantingsconstanten bekend zijn die het intensiteitsprofiel bepalen. Als het intensiteitsprofiel van het licht uit de glasvezel niet goed aansluit op het profiel dat in de film kan bestaan, zal dit grote koppelingsverliezen veroorzaken. Daar komt bij dat de demping van de film op zich, in vergelijking met die van de vezel, al erg hoog is. Rekent men bij vezels in tienden van dB per kilometer, bij OIC's treden dempingen op van enkele dB per centimeter.

Voor een goed inzicht in de voortplanting van het licht in de film wordt in het onderstaande het begrip "golfgeleidermodus" of "oppervlaktemodus" geïntrodu-Het blijkt dat het licht zich in de film uitsluitend volgens bepaalde "modi" kan voortplanten. In de geometrische optica worden deze modi voorgesteld door stralen, die met een voor elke modus karakteristieke hoek Θ aan de grenslagen ("interfaces") reflecteren. Het grootste deel van de lichtenergie blijft zo gevangen in de film, net boven het substraat; vandaar dat deze modi oppervlaktegolfmodi ("Surface Wave-modi") worden genoemd. De SW-modi worden geordend door hun modegetallen. Deze corresponderen met het aantal maxima in het bijbehorende intensiteitsprofiel verminderd met 1. De laagste orde modus - dit is de nulde orde modus (ook wel de fundamentele modus genoemd) - heeft precies één maximum; de eerste orde modus heeft er twee, enzovoorts.
In figuur 3 zijn de stralen en de intensiteitsprofielen van de fundamentele en de eerste orde modus getekend; merk op dat het intensiteitsprofiel zich nog enigszins buiten de film uitstrekt (diëlectrische golfgeleiders zijn open golfgeleiders). In een symmetrische golfgeleider (dan is $n_s = n_c$) kan de fundamentele modus zich altijd voortplanten. Dit geldt niet voor hogere orde modi.
Een m^e-orde modus zal pas in de film kunnen bestaan bij een voldoende grote filmdikte d, een voldoend groot indexcontrast n_f-n_s, of een voldoende kleine golflengte van het gebruikte laserlicht. Zijn de eerste twee parameters te klein of is de laatste te groot, dan wordt zo'n modus afgesneden ("cut-off").

De genormaliseerde frequentie $V = k_o.d(n_f^2-n_s^2)^{1/2}$ met $k_o = 2\pi/\lambda_o$ (λ_o: golflengte in vacuüm) verenigt de genoemde drie parameters. Bij een gegeven waarde V kan in de film dus slechts een eindig aantal SW-modi bestaan; voor een asymmetrische film kan dit aantal, bij kleine waarden van V, nul zijn. De OIC's zijn doorgaans zo gedimensioneerd dat ze monomodus zijn.



Figuur 3: Intensiteitsprofiel en stralen voor modi met m=0 en m=1

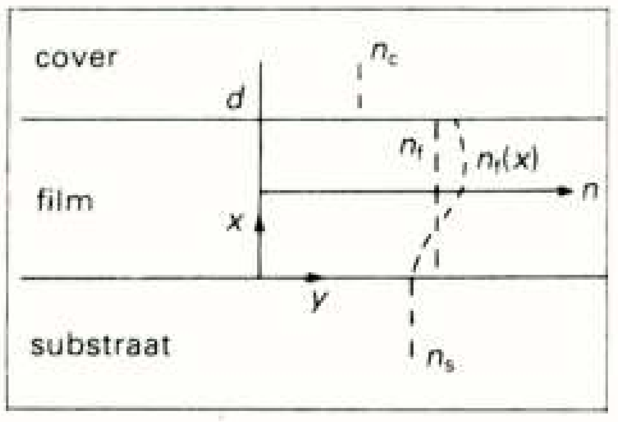
Voor de voortplantingsrichting is de z-richting gekozen (figuur 2, x is de verticale richting loodrecht op de film, en y de laterale richting in het vlak van de film en loodrecht op de voortplantingsrichting). De fasecoëfficiënt k_z in de z-richting (ook genoteerd als β) is voor elke modus verschillend; in plaats van k_z werkt men meestal met de genormeerde grootheid $N = k_z/k_o$, de "mode-index".
Er geldt nog steeds dat

$$n_s < N^{(m)} < N^{(m-1)} < \ldots\ldots < N^{(1)} < N^{(0)} < n_f$$

Hierin is dan $N^{(m)}$ de mode-index van de m^e modus. Hogere orde modi hebben kleinere mode-indices, en dus ook kleinere k_z-waarden, ze "botsen" daarom per lengte-eenheid in de z-richting vaker tegen de grenslagen (figuur 3); vandaar dat hogere orde modi door strooiingsverliezen sneller uitdempen dan lagere orde modi.

Samenvattend kan dus worden vastgesteld dat het licht in de film zich voortplant volgens een eindig aantal, discrete SW-modi die door totale reflectie aan de grenslagen zijn opgesloten.
Vanzelfsprekend is het van belang om voor een gegeven golfgeleider (met bekende filmdikte en brekingsindexprofiel) de k_z-waarden van de diverse modi te kunnen bepalen.
De afleiding van een resonantieconditie waaruit rechtstreeks de k_z-waarden volgen, kan op twee manieren gebeuren. Met behulp van de geometrische optica volgt deze conditie direct door te eisen dat het verschil in fase van een straal aan het begin en eind van een "reis" van de substraat/film interface naar de film/cover interface en weer terug een geheel aantal keren 2π moet bedragen.
Anderzijds volgt deze conditie ook uit de Maxwell-vergelijkingen voor het electrische veld $\underline{E}(x)$ en het magnetische veld $\underline{H}(x)$, met de randvoorwaarden die eisen dat de tangentiële veldcomponenten continu zijn over de interfaces. Deze zes partiële differentiaalvergelijkingen kunnen worden ontkoppeld in twee groepjes van drie, omdat in de laterale richting (de y-richting) van de film geen inhomogeniteiten optreden.
Deze ontkoppeling correspondeert met twee polarisaties die in de film ook daadwerkelijk onafhankelijk kunnen optreden: de TE-polarisatie en de TM-polarisatie. Bij TE-polarisatie staat de electrische veld-vector $\underline{E}$ loodrecht op het vlak waarin de straal zich voortplant ("Traverse Electric"), en bij TM-polarisatie juist de magnetische veld-vector $\underline{H}$ ("Transverse Magnetic").

De k_z-waarden voor deze polarisaties ontlopen elkaar niet veel (afhankelijk van de asymmetrie van de golfgeleider). Het onderscheid in polarisatie volgt bij de geometrische benadering door de fasesprongetjes, die plaatshebben aan de grensvlakken (Goos-Haenchen shift), verschillend in rekening te brengen.
De index n_f van de film hoeft niet persé constant te zijn, zoals wèl het geval is bij step-index golfgeleiders. Als n_f verandert met x ($n_f = n_f(x)$), dan spreekt men van een graded-index film (figuur 4).



Figuur 4: Step-index en graded-index profiel

Voor step-index golfgeleiders zijn de k_z-waarden nog eenvoudig te bepalen, omdat een expliciete uitdrukking voor resonantieconditie is af te leiden.
Bij graded-index films is dit niet zo; slechts voor een zeer speciale functies $n_f(x)$ kan dit nog wel. De graded films die door diffusie ontstaan hebben in het algemeen niet zo'n speciaal profiel. Er bestaan diverse mathematische modellen om de propagatieconstanten van dit soort films te bepalen.
Een aantrekkelijk model is gebaseerd op de transfermatrix methode (TFM); deze is op het Dr. Neher Laboratorium uitgewerkt (N.H.G. Baken, 1984, 1985). Met behulp van de transfer-matrix T van de film wordt een veldvector F, die uitsluitend de tangentiële veldcomponenten bevat, van de onderste naar de bovenste interface overgebracht.

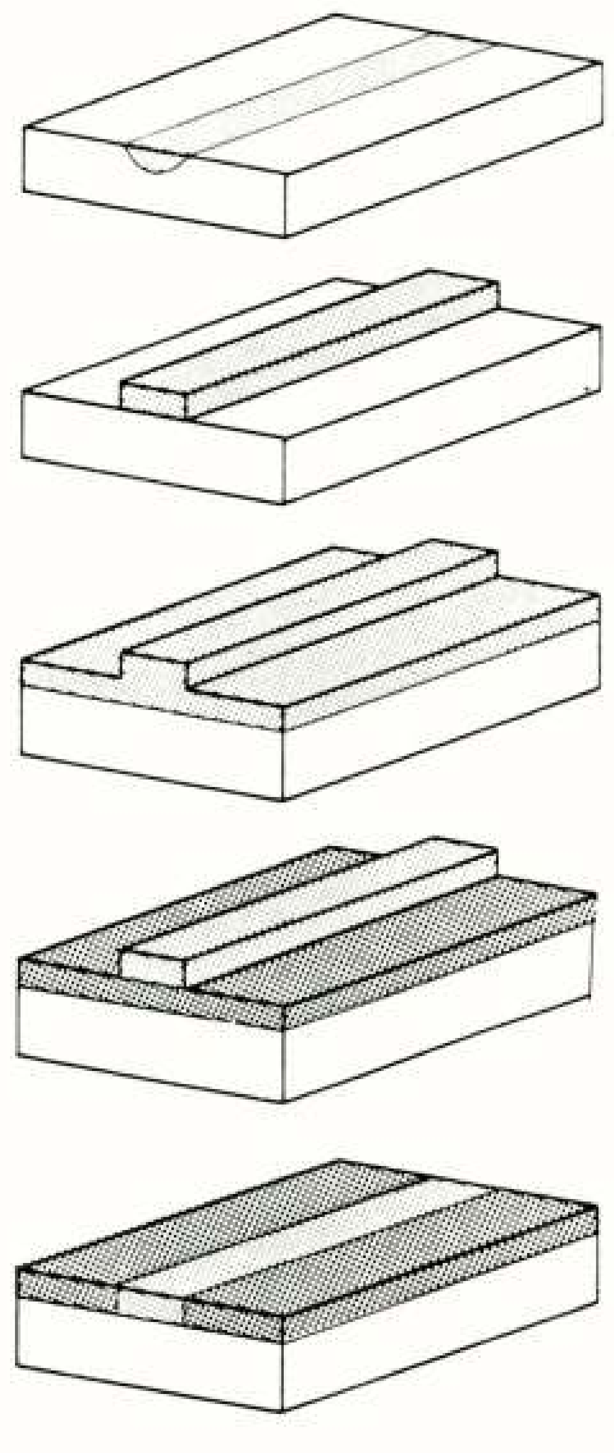
$$F_c = T\,F_s$$

Uit deze relatie kan direct de resonantieconditie worden afgeleid, en daaruit volgen dan de mode-indices. Vervolgens kunnen de velden worden bepaald. Op het Dr Neher Laboratorium (DNL) zijn computerprogramma's ontwikkeld (geënt op TFM) die voor een willekeurig brekingsindexprofiel de mode-indices en de veldcomponenten (TE en TM) berekenen. Ook voor dikkere films blijft dit programma numeriek stabiel. Tevens kunnen deze programma's worden gebruikt als basis voor approximatieve modellen voor tweedimensionale golfgeleiders (Effectieve Index Methode (Van der Tol, 1985));

Tweedimensionale golfgeleiders

De meest eenvoudige component is de reeds besproken film. Als opnieuw de z-richting als voortplantingsrichting wordt gekozen, dan kan het licht uit een glasvezel in de film worden gekoppeld door de kopse kant van de vezel zodanig tegen de kopse kant van het OIC, het xy-vlak, te plaatsen dat de vezelkern en de film op elkaar aansluiten. Het ingekoppelde licht zal dan in de film divergeren in de laterale richting. Om dit te voorkomen moet de brekingsindex in het verlengde van de vezelkern in de film worden verhoogd; er is dan een kanaalgolfgeleider, of strookgeleider gemaakt.
Er bestaan diverse uitvoeringen van strookgolfgeleiders (figuur 5). Strookgeleiders kunnen fungeren als verbindingen tussen verschillende componenten op eenzelfde substraat, of zij zijn een onderdeel van meer gecompliceerde componenten zoals richtkoppelingen of interferometers. Ook de strookgolfgeleiders kunnen een step-index profiel of een graded-index profiel hebben.

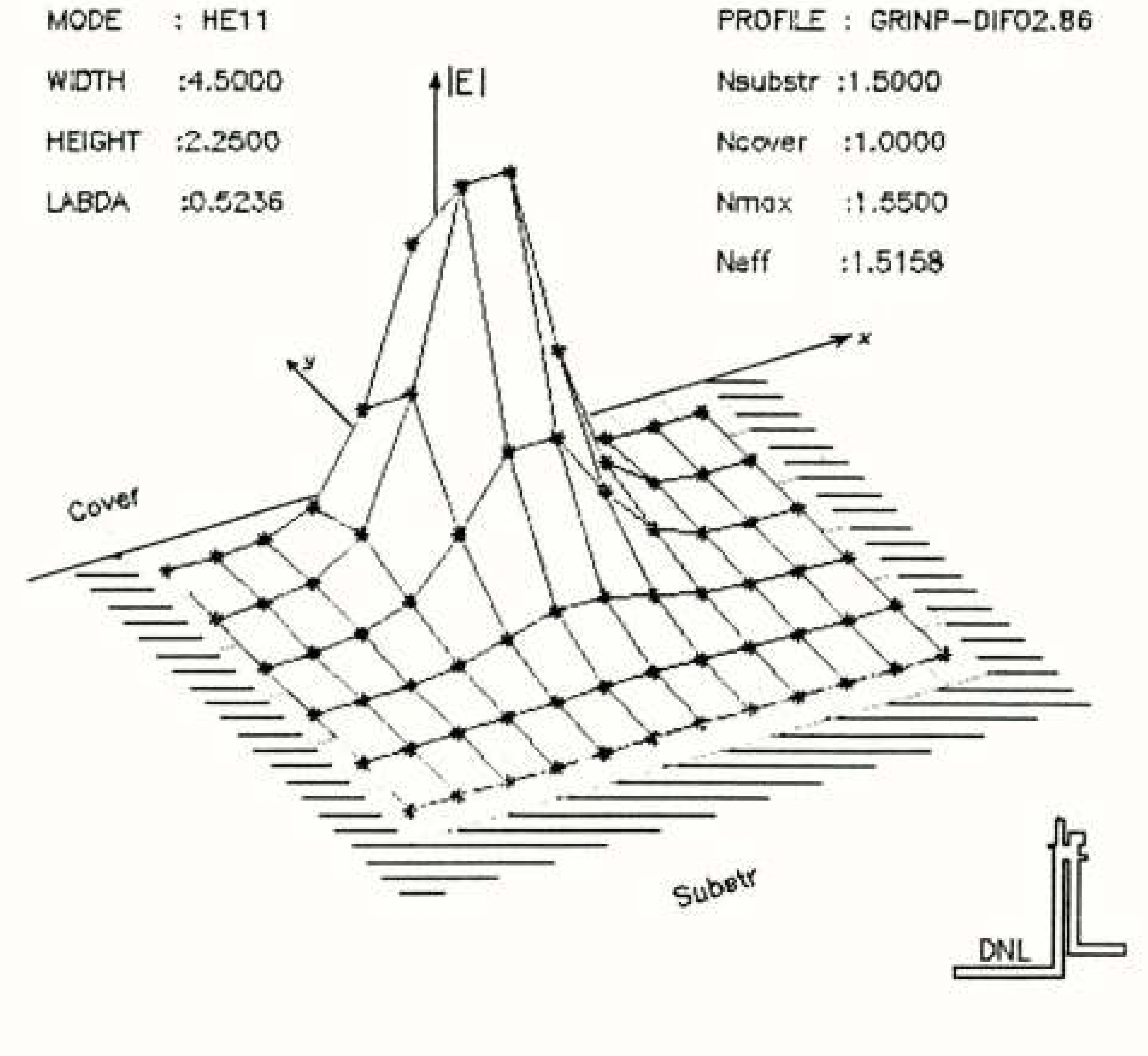
Een graded-index profiel is vereist voor een goede vezel-chip koppeling bij een multimodus glasvezel, omdat dit type vezel doorgaans een graded-index kern heeft. Het is frappant dat, zelfs voor een eenvoudige strookgolfgeleider, het veel moeite kost om de voortplantingsconstanten nauwkeurig te bepalen, zeker als die nabij de afsnijfrequenties liggen.
De nauwkeurigheid van diverse benaderende fysisch-mathematische modellen is hierbij doorgaans erg ondoorzichtig. Toch zijn nauwkeurige benaderingen van belang, met name omdat de strookgolfgeleiders monomodus zijn en de bijbehorende k_z-waarde van de fundamentele modus niet veel van de afsnijfrequentie hoeft af te wijken. Bij een mathematische analyse blijkt dat de Maxwell-vergelijkingen niet meer kunnen worden ontkoppeld. Toch kunnen nog twee types van oplossingen worden onderscheiden, elk met zes componenten, namelijk de EH-modi en de HE-modi. Naarmate de breedte van de strookgolfgeleider toeneemt zullen de fundamentele EH-modi steeds meer gaan lijken op de TM-modi en de HE-modi op de TE-modi.



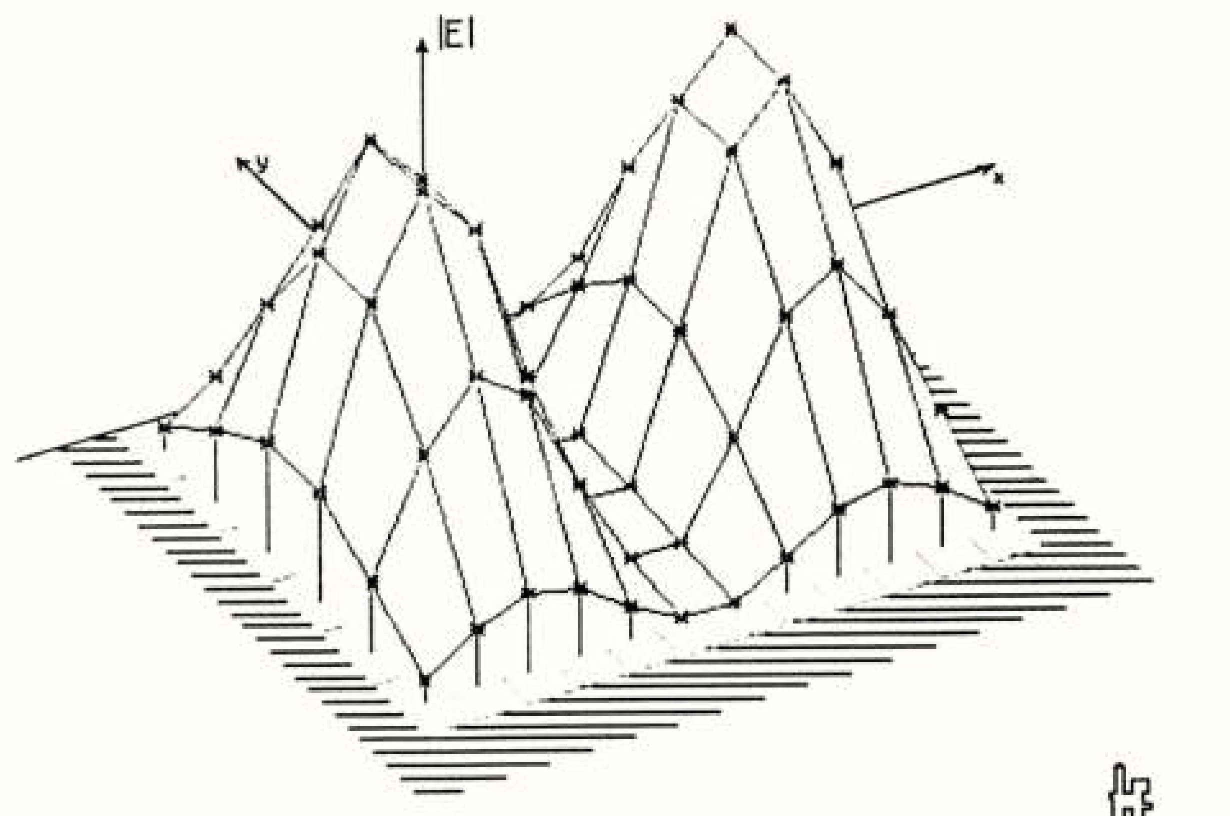
Figuur 5: a. Ingediffundeerde of geïmplanteerde golfgeleider
b. 'Strip' golfegleider
c. 'Ridge' golfgeleider
d. 'Strip loaded' golfgeleider
e. 'Embedded' golfgeleider.

Het mathematische model dat op het DNL is geïmplementeerd om tweedimensionale golfgeleiders te beschrijven is gebaseerd op de Domein Integraal vergelijkingsmethode (prof. H. Blok, 1986); het bijbehorende computerprogramma is ontwikkeld in samenwerking met de Technische Universiteit Delft (vakgroep "theoretische electriciteitsleer", onder leiding van de professoren Van Den Berg, Blok en De Hoop). Resultaten van dit programma voor de veldverdeling van een ingediffundeerde golfgeleider zijn gegeven in figuur 6.

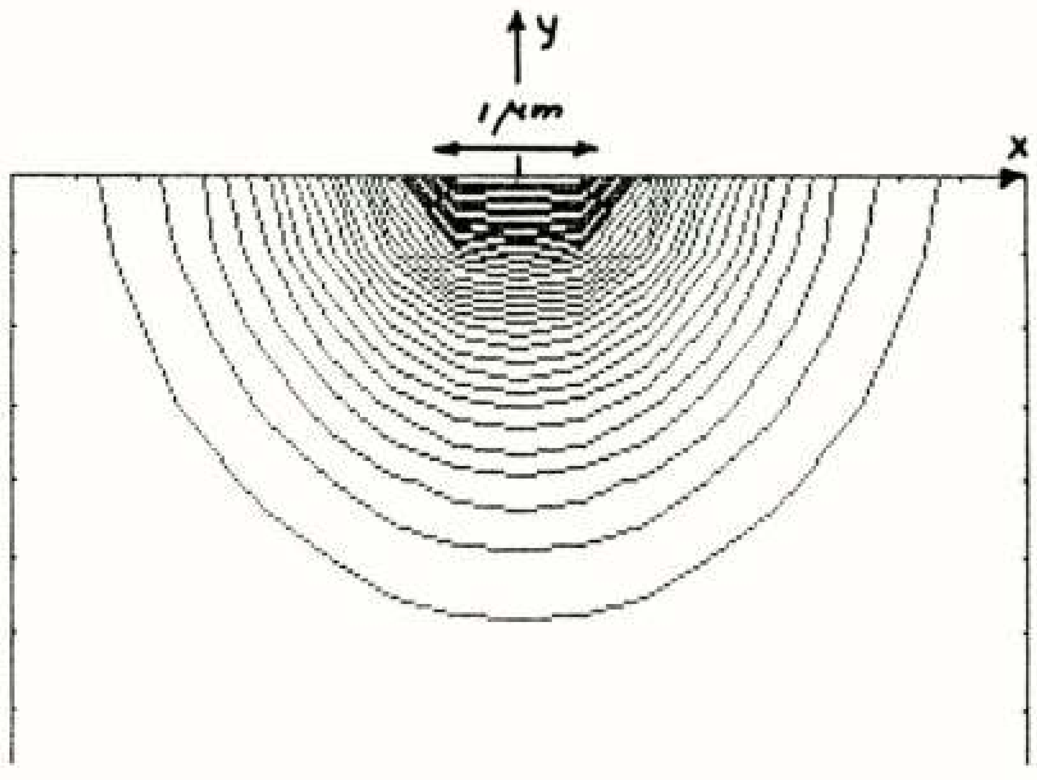
In 6a is de fundamentele modus HE11 en in 6b de 1e orde modus EH21 afgebeeld; het index-profiel van de golfgeleider van 4,5 bij 2.25 micron wordt gegeven door de contour-plot in 6c. De gebruikte grafische routines zijn geënt op de Graphical Kernel Standard (N.H.G. Baken, 1986).



Figuur 6a: Intensiteit-plot HE11-mode



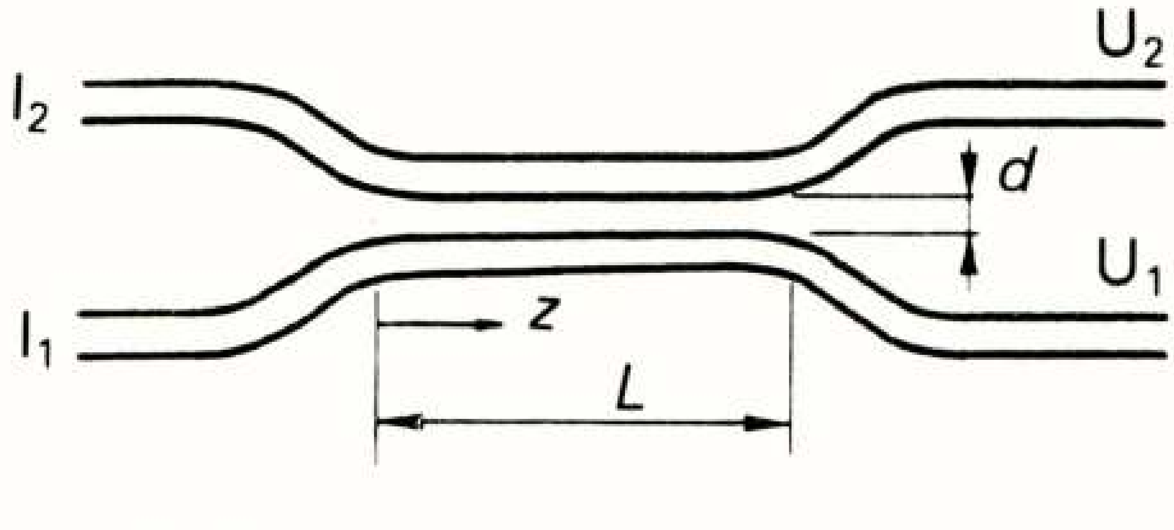
Figuur 6b: Intensiteit-plot EH21-mode



Figuur 6c: Contour-plot diffusie-profiel

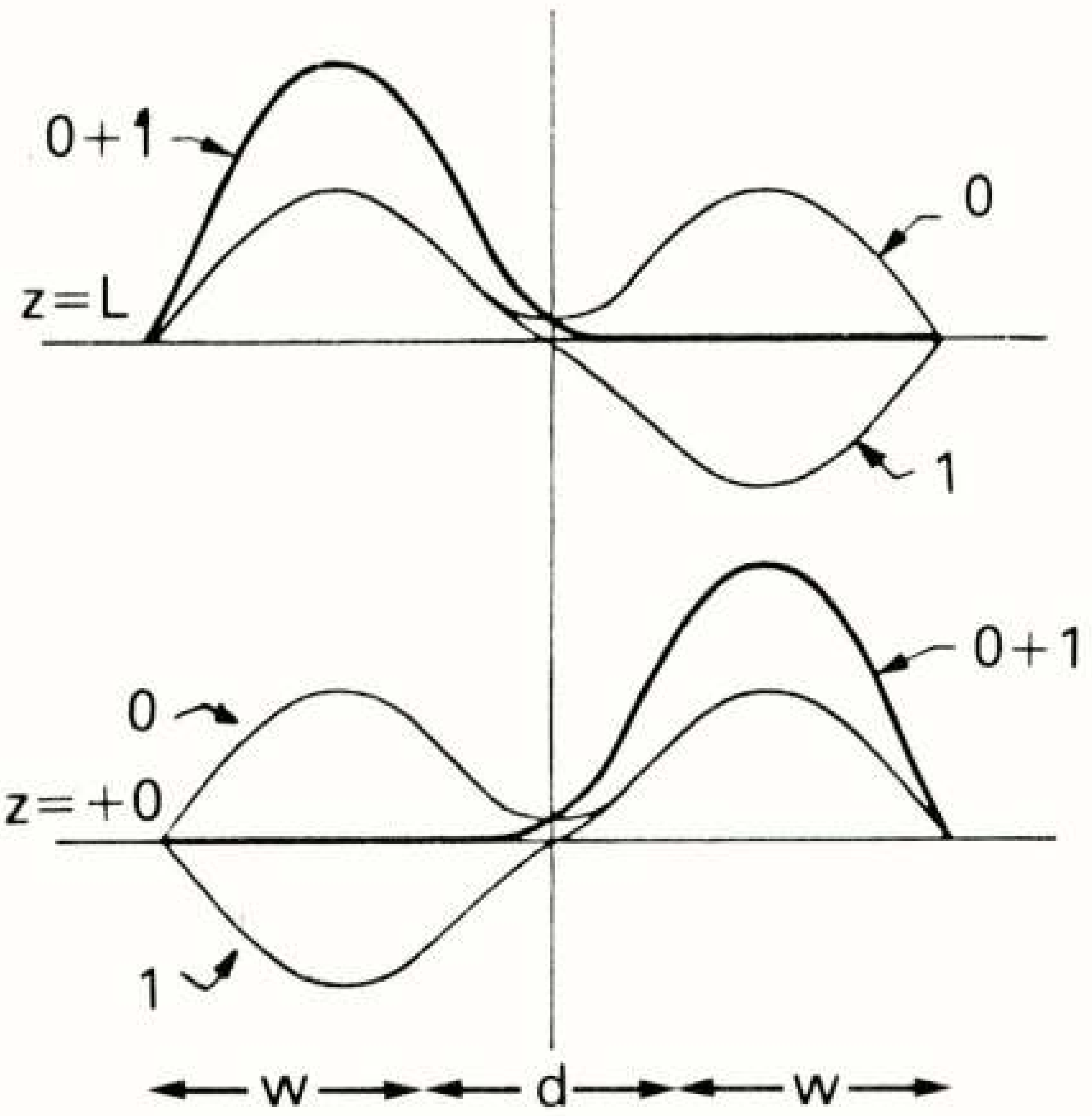
Richtkoppelingen

De richtkoppeling ("directional coupler") is een voorbeeld van een component die meer complexe signaalmanipulaties kan uitvoeren. Hier wordt dieper ingegaan op de werking van de passieve richtkoppeling (figuur 7); deze component is te gebruiken als vermogensplitser of filter. Het hart van de koppeling wordt gevormd door twee evenwijdige, identieke strookgolfgeleiders; er zijn twee ingangspoorten I_1 en I_2 en twee uitgangspoorten U_1 en U_2 (I en U duiden op de plaats van de poort of op het vermogen). De strookgolfgeleiders zijn monomodus, alleen de fundamentele modus kan in een enkele golfgeleider propageren met fasecoëfficiënt β. Als deze modus de koppeling bereikt via I_1, slaat deze de modi aan die kunnen optreden in de golfgeleider die gevormd wordt door de twee parallelle strookgolfgeleiders met de tussenruimte d.



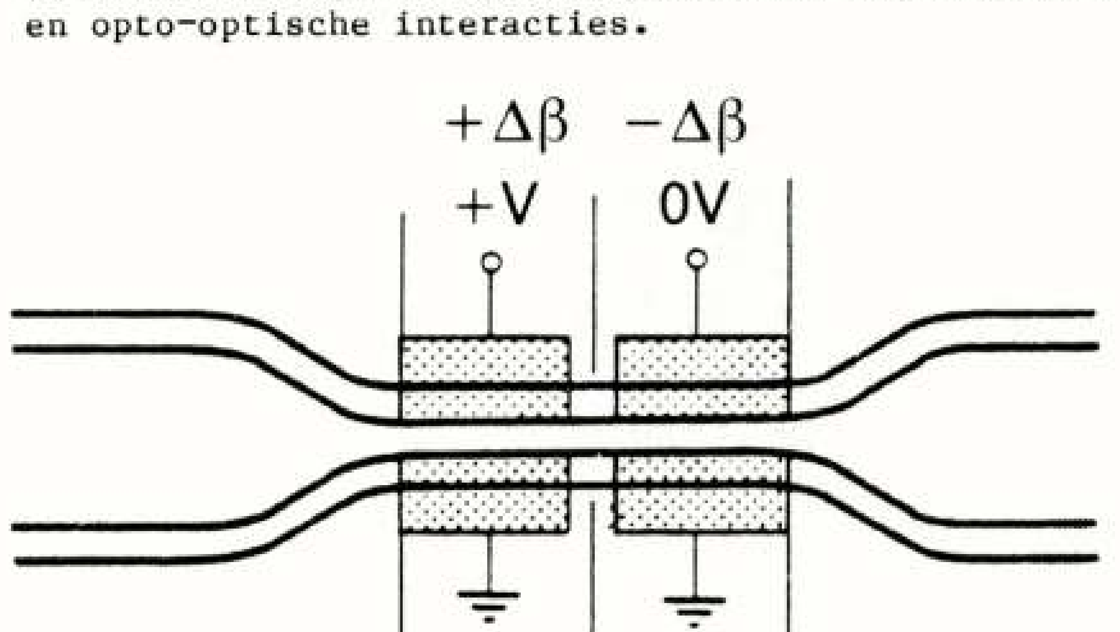
Figuur 7: Directional coupler

Deze configuratie is zo gedimensioneerd dat de fundamentele modus en de eerste orde modus zich hierin lateraal kunnen voortplanten, zeg met de fasecoëfficiënten β_0 en β_1. Aan het begin van de koppeling zijn deze modi in fase; aangenomen is dat beide dezelfde amplitude hebben (figuur 8), zodat voor z=0 inderdaad de intensiteit is geconcentreerd in de onderste strookgolfgeleider. Doordat $\beta_0 > \beta_1$ zal met toenemende waarden van z het licht overlekken naar de bovenste geleider; indien $\pi = L\,(\beta_0 - \beta_1)$ zal gelden dat $U_2 = I_1$ en $U_1 = 0$. Aangezien β_0 en β_1 beide functies zijn van de golflengte van het gebruikte licht, is ook L (de koppelingslengte voor 100% overdracht) een functie van de golflengte. Dit laatste maakt het mogelijk om de richtkoppeling (of een combinatie van richtkoppelingen) uit te voeren als een optische filter.



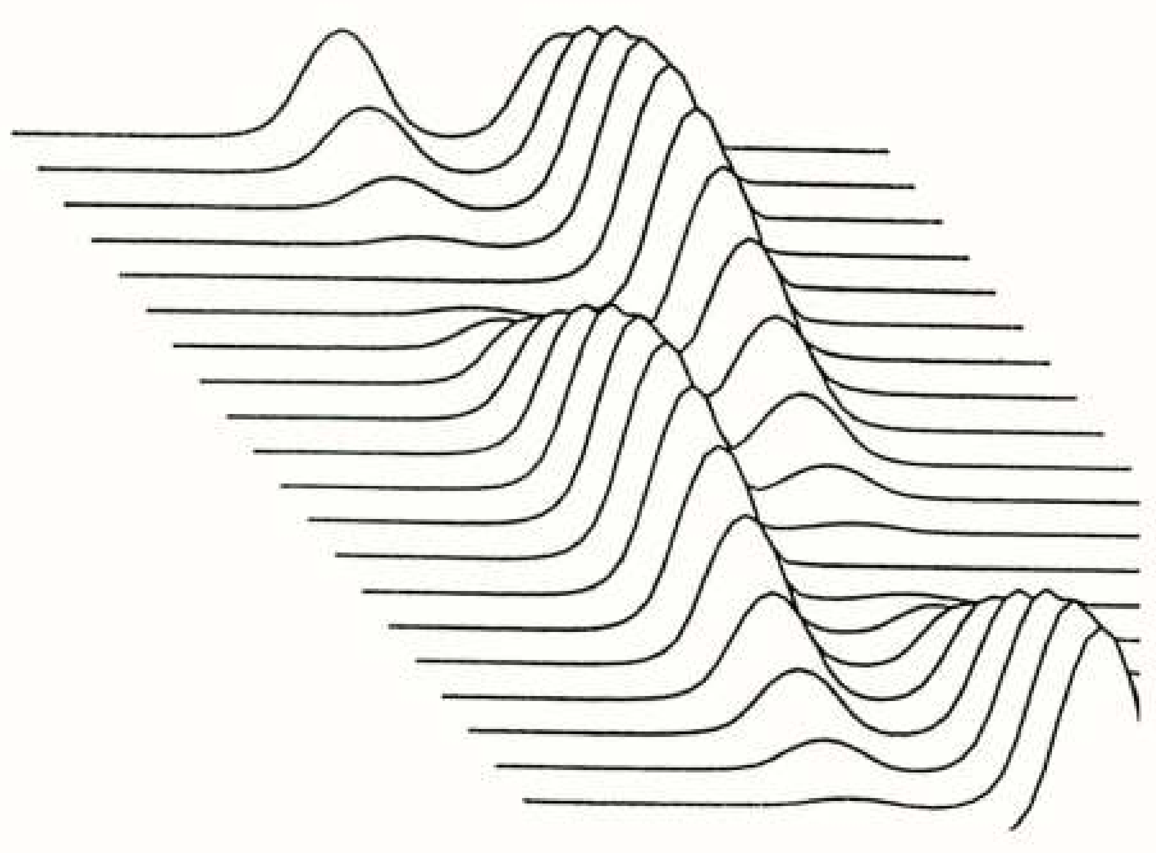
Figuur 8: Fundamentele modus 0 en eerste orde modus 1 in richtkoppeling voor z=0 en z=L; w is de breedte van de twee strookgolfgeleiders.

De in figuur 7 afgebeelde richtkoppeling is een passieve component; de koppellengte en dus ook het vermogen bij U_1 en U_2 ligt vast. Componenten waarvan de werking wel (extern) gestuurd kan worden heten actieve componenten. Deze sturing geschiedt door op één of meer plaatsen in de component de effectieve brekingsindex, en hiermee de effectieve lengte van karakteristieke afmetingen, te wijzigen.
Zo veranderen bij de als actieve component uitgevoerde richtkoppeling (figuur 9), de effectieve lengte L en de afstand d tussen de evenwijdige strookgolfgeleiders door de spanningen over de aangebrachte electrodes te variëren. Het overgekoppelde vermogen van de onderste naar de bovenste strookgolfgeleider is dan een functie van de spanningen, en dus van de tijd. De actieve richtkoppeling kan zo fungeren als modulator of als schakelaar.
De verandering van de effectieve brekingsindex treedt op tengevolge van een electro-optisch effect; dit kan uitsluitend bij een substraatmateriaal waarin de interactie van licht met een aangelegd electrisch veld niet te verwaarlozen is. De electro-optische interactie treedt ook op in de halfgeleiderlasers, waarvan het vermogen wordt gestuurd door de injectiestroom. Andere mogelijkheden om de effectieve brekingsindex te beïnvloeden zijn de akoesto-optische, magneto-optische en opto-optische interacties.



Figuur 9: Reversed $\Delta\beta$ coupler

Op het DNL zijn programma's aanwezig om de werking van richtkoppelingen (als functie van diverse parameters) te stimuleren, zie figuur 10.



Figuur 10: Simulatie van de werking van een richtkoppeling.

Conclusie, stand van zaken, verder onderzoek

De geïntegreerde optica is een nog jonge discipline (1969). Kennis uit een aantal andere vakgebieden is in de geïntegreerde optica verenigd. Voor de meer theoretische aspecten is kennis van (geometrische) optica en het electromagnetische veld in diëlectrische materialen onontbeerlijk. Bij de technologie spelen onder andere de volgende technieken een rol: diffusie, epitaxie, sputteren en fotolithografie.
Tezamen kunnen deze vaardigheden optische microcircuits opleveren die in combinatie met glasvezel de sleutel vormen tot volledig optisch of opto-electronische systemen. Op het dr Neher Laboratorium van de PTT worden bij het geïntegreerde optica onderzoek de theoretische en technologische inspanningen nu gezamenlijk ingezet voor het realiseren van een totale interne reflectie schakelaar op basis van een polymeer met goede electro-optische eigenschappen; dit laatste gebeurt in het kader van het RACE onderzoek. Verder onderzoek betreft het realiseren van richtkoppelingen op basis van 3-5 halfgeleiders (InP substraat). Veel onderzoek is besteed aan passieve componenten gemaakt met in glas gediffundeerde golfgeleiders. Programma's om de index verdeling van dit soort golfgeleiders te voorspellen zijn geïmplementeerd en experimenteel geverifieerd. De brekingsindex profielen fungeren weer als input-data voor programma's die de propagatie-eigenschappen en de velddistributies kunnen bepalen. De laatste kunnen op hun beurt eveneens experimenteel worden gecontroleerd. Voor wat de theoretische aspecten betreft zullen bij het toekomstige onderzoek ook absorptie, anisotropie en electro-optische interacties worden meegenomen, dit in samenwerking met de Technische Universiteit Delft. Tevens zal aandacht worden besteed aan Propagating Beam Methods waarmee een simulatie van driedimensionale geïntegreerde optische componenten mogelijk wordt.

Literatuur

Baken, N.H.G.
DNL Memorandum 1206 NW/84
Oppervlakte- en lekkende golf-modi in planaire diëlectrische golfgeleiders; berekeningen voor TE-polarisatie volgens het transfer-matrix-formalisme, toepassingen voor de geïntegreerde optica

Baken, N.H.G.
DNL Memorandum 1294 NW/85
Geïntegreerde optica, graded-index films;
effectieve indices en velden voor TE- en
TM-polarisatie

Baken, N.H.G.
Geïntegreerde optica
Nieuwe perspectieven in optische communicatie systemen
DNL-monografie 8502 (verkrijgbaar bij secretariaat
DNL)

Baken, N.H.G.; Van den Berge, D.J; Van Bochhove, A.C.
DNL Memorandum 1359 NW/86
Computergrafiek;
Implementatie van het Graphical Kernel System door het
pakket NOVA-GKS

Blok, H.; Baken, N.H.G.; Dane, M.F.;
Van Splunter, J.M.
Computational Analysis of Propagating Properties of
Integrated-Optical Waveguides using a Domain Integral
Equation
Proc. URSI int. symp. on Electromagnetic Theory
Boedapest, augustus 1986

Van der Tol, J.J.G.M.
DNL Memorandum 1327 NW/85
Approximatieve methoden voor de berekening van de
propagatieconstanten van tweedimensionale
golfgeleiders. Toepassing op richtkoppelingen.
Numerieke implementatie van de Effectieve Index
Methode

Voordracht gehouden tijdens de 344e werkvergadering.

PASSIEVE OPTISCHE COMPONENTEN VOOR DE OPTISCHE COMMUNICATIE

J.H. Angenent
Philips Natuurkundig Laboratorium
Nederlandse Philips Bedrijven BV.

Planar passive optical components for optical communication purposes

Future optical communication systems will be more complex in comparison with present systems. The structure of the network (subscriber systems) and transmission technology (coherent systems) will become more sophisticated. Those systems need more and novel passive optical components. To fulfill the expected demands for optical components, new technologies must be explored for the production of cheap passive components in large quantities and for the improvement of the components for special systems. Planar technologies have potentially the ability to satisfy these specifications. Some general aspects of planar passive optical components are discussed.

Optische communicatie systemen.

Weinig mensen zullen meer twijfelen aan het voordeel van glasvezel-transmissie boven transmissie met koperkabels. De grote bandbreedte en lage demping hebben glasvezels tot een ideaal medium gemaakt voor breedbandige signaaloverdracht over grote afstanden. Op veel plaatsen in de wereld worden dan ook verbindingen tussen telefooncentrales voorzien van glasvezels.

Als optische netwerk gezien, zijn dit zeer eenvoudige systemen. Een halfgeleiderlaser dient als lichtbron en zet een digitaal electrische signaal om in lichtpulsen. Deze lichtpulsen worden door een glasvezel een aantal kilometers getransporteerd en daar gedetecteerd door een fotodiode. Na electronische versterking en regeneratie kan het signaal, indien nodig, door middel van een laser weer in lichtpulsen omgezet worden en verder getransporteerd. Verbeteringen hebben zich in het optische stuk tot op heden hoofdzakelijk beperkt tot de laser, de fotodiode en de glasvezel. De frequentie waarmee een laser gemoduleerd kan worden is in de loop der jaren verhoogd evenals de maximale intensiteit van het licht, de fotodiode is gevoeliger gemaakt en de demping van de glasvezel verlaagd. De gebruikte golflengte van het licht is van 850nm via 1300nm naar 1550nm gegaan omdat de demping van de glasvezel bij langere golflengte kleiner is. Doel van deze inspanningen is de versterkerafstand zo groot mogelijk en de te gebruiken signaal frequentie zo hoog mogelijk te maken. Systemen met frequenties boven 1 Gbit/s zijn al verkrijgbaar en het is te verwachten dat de afstand tussen twee versterkers zal toenemen tot boven de 100km.

Men verwacht echter dat binnen enkele jaren optische communicatie systemen complexer en geavanceerder gaan worden. Hierbij valt ondermeer te denken aan abonneenetwerken of bedrijfsnetten (local area networks). Bij een optisch abonneenetwerk wordt gedacht aan een integratie van diensten zoals telefoon, televisie, radio, viditelachtige diensten enz. naar de abonnee toe. Glasvezels worden gebruikt voor het transport van de informatie tot aan de abonnee, of in sommige modellen zelfs voor het transport van informatie tussen de verschillende kamers van de abonnee (Khoe 1986).

Parallel aan de ontwikkelingen naar complexere netwerk structuren wordt gewerkt aan optische communicatie systemen met andere vormen van modulatie. Een voorbeeld daarvan is een coherent systeem met heterodyne detectie (Delange 1968, Okoshi 1984). In tegenstelling tot directe detectie systemen waarbij de informatie vastgelegd wordt door het aan- en uitschakelen van de laser, wordt bij een coherent systeem de optische frequentie van de laser als draaggolf gebruikt in analogie met radio communicatie (AM, FM enz). Deze gemoduleerde optische draaggolf wordt op de plaats van de detectie gemengd met het signaal van een locale oscillator (een tweede laser). De optische frequentie van de locale oscillator is verschoven ten opzichte van de optische frequentie van de signaallaser. In de fotodiode (een kwadratisch element) komt de verschil frequentie (de midden frequentie) van beide lasers beschikbaar. Met een demodulator kan dan het gewenste signaal uitgefilterd worden. Voordeel van dit principe is een verhoogde detector gevoeligheid en de mogelijkheid optimaal gebruik te maken van de optische frequenties. Doordat de optische frequentie (ca. 200 THz) veel groter is dan de midden frequentie (1 GHz), kunnen vele signalen onafhankelijk van elkaar door een glasvezel getransporteerd worden. Elk signaal wordt dan uitgezonden door een laser met een iets verschoven frequentie ten opzichte van de andere lasers. Bij de op dit moment gebruikte meer golflengte systemen worden de verschillende golflengten gescheiden door optische com-

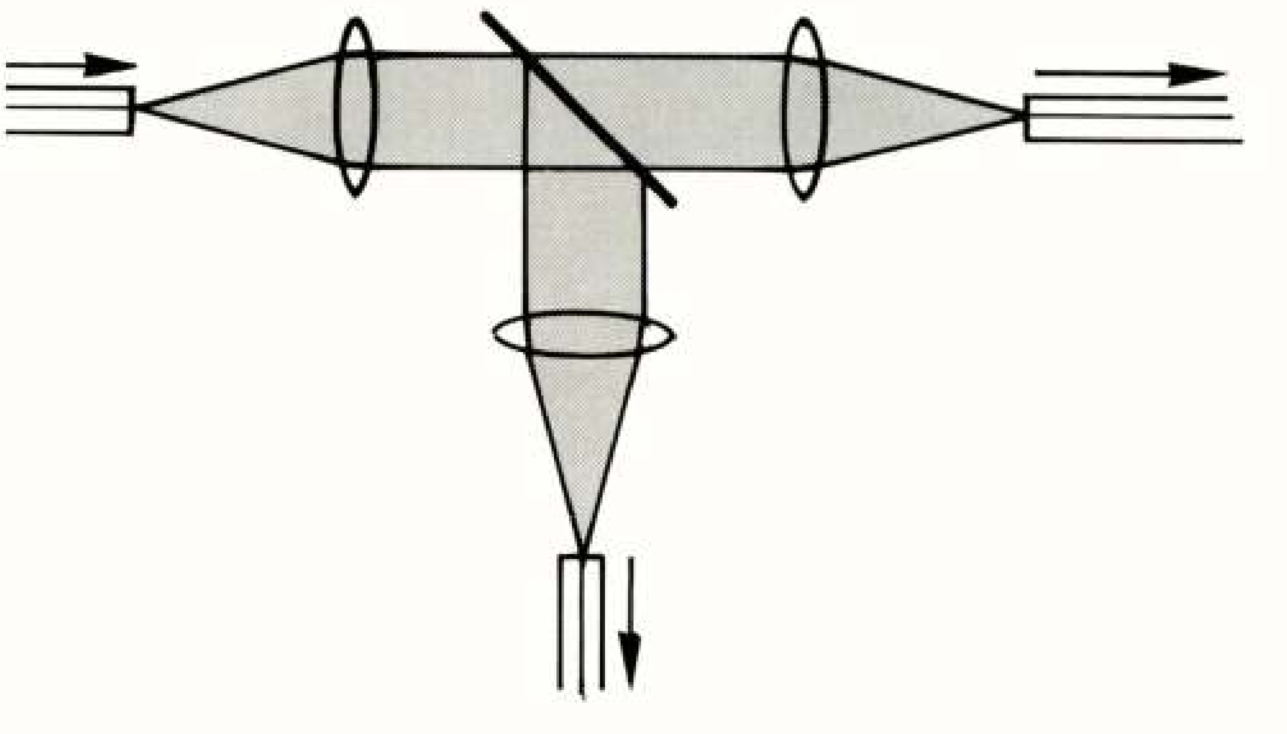
ponenten zoals tralies of interferentie filters. De golflengte resolutie van deze componenten ligt in de orde van 10nm terwijl in een coherent systeem een kanaalscheiding van 0,1nm haalbaar geacht wordt.

Met de toenemende complexiteit van zowel het optische netwerk als van de transmissie vorm zal het aantal optische componenten in het systeem toenemen. Deze optische componenten kunnen verdeeld worden in passieve en actieve componenten. In passieve componenten kan de gang van het licht niet in de tijd gevarieerd worden dit in tegenstelling tot actieve componenten zoals bijvoorbeeld componenten uit electro-optisch materiaal waarbij met een electrisch veld de brekingsindex van het materiaal beinvloed kan worden. Schakelen, modulatie of draaiing van de polarisatierichting is met dit type component mogelijk. Actieve en passieve componenten worden vaak van verschillende materialen en met verschillende technologieën gemaakt. Om deze reden kan het gewenst zijn het onderzoek aan beide typen componenten te scheiden. Tevens verschilt het tijdstip waarop beide soorten componenten beschikbaar zijn. Het is te verwachten dat passieve componenten al over enkele jaren op grote schaal gebruikt gaan worden terwijl actieve componenten wellicht later beschikbaar komen. Voorbeelden van passieve componenten die in complexe netwerk structuren gebruikt worden zijn: een vermogenverdeler (splitter) waarbij licht uit een glasvezel verdeeld wordt over meerdere uitgaande glasvezels, een multiplexer waarbij meerdere ingangsignalen samengevoegd worden en over één glasvezel verder getransporteerd worden, een sterkoppeling waarbij na een menging van meerdere ingangsignalen een verdeling over meerdere glasvezels plaatsvindt en golflengte afhankelijk componenten die noodzakelijk zijn in systemen waarin gebruik gemaakt wordt van meerdere golflengten van het licht om verschillende signalen door een glasvezel te transporteren. Hiermee wordt niet alleen de capaciteit van de glasvezel verhoogd maar is het ook mogelijk signalen in beide richtingen door een glasvezel te transporteren. Voor een coherent systeem zijn specifieke optische componenten noodzakelijk, bijvoorbeeld componenten om de twee signalen te mengen en componenten om de polarisatie van het licht te regelen.

De voor systemen gebruikte glasvezels kunnen verdeeld worden in twee typen, multimodus en monomodus. De multimodus glasvezel heeft een kerndoorsnede van 50μm en de monomodus glasvezel een kerndoorsnede van 10μm. De tendens bestaat in de toekomst het overgrote deel van de systemen uit te voeren met de superieure monomodus glasvezel, ondanks de veel zwaardere eisen die deze keuze aan de optische componenten stelt. Om aan de te verwachten vraag te kunnen voldoen zal onderzoek aan passieve componenten zich moeten concentreren op dit monomodus gebruik en zal naast het realiseren van nieuwe functies en het verbeteren van de eigenschappen van gerealiseerde functies ook als doel hebben het vinden van productiemethoden waarmee deze componenten goedkoop in grote aantallen gemaakt kunnen worden.

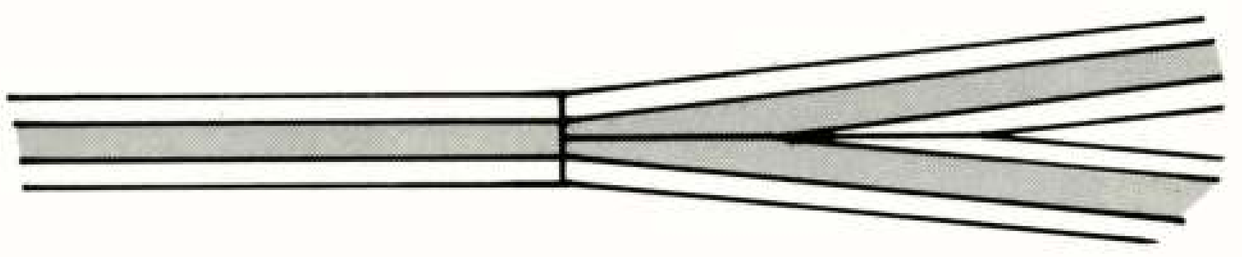
Passieve optische componenten.

Een van de manieren om een passief component te maken is met behulp van discrete elementen. In figuur 1 is een voorbeeld gegeven voor een eenvoudige splitter. Van het divergerende licht uit een glasvezel wordt een parallele bundel gemaakt door middel van een lens. De bundel wordt met een halfdoorlaatbare spiegel gesplitst en beide bundels worden met een lens weer afgebeeld op de kern van een glasvezel. Het is duidelijk dat door de positionering van drie lenzen en een halfdoorlaatbare spiegel deze oplossing niet erg geschikt is voor massaproductie en wordt dan ook hoofdzakelijk voor laboratorium doeleinden gebruikt.



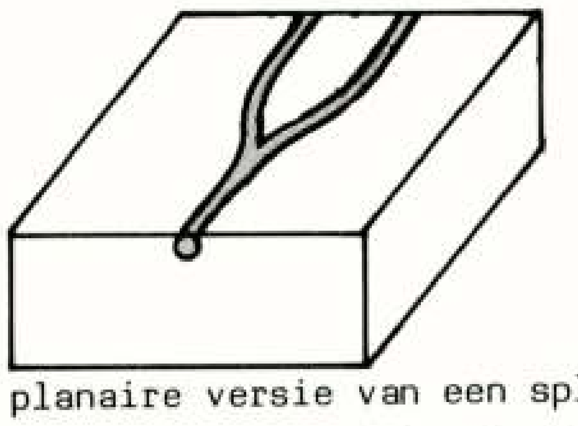
Figuur 1: Een optische splitter opgebouwd uit discrete elementen. Het licht uit een glasvezel wordt door een halfdoorlaatbare spiegel verdeeld, waarna de bundels weer op twee glasvezels worden afgebeeld.

Glasvezelcomponenten zijn wat dat betreft veel praktischer. Doordat het licht in de glasvezel blijft en veel minder elementen een rol spelen kan de demping van dit soort componenten zeer laag zijn, bovendien zal de stabiliteit groter zijn dan bij vergelijkbare componenten met discrete elementen. In figuur 2 is een voorbeeld van een glasvezelcomponent gegeven. Door slijpen, samensmelten of andere bewerkingen kunnen splitters, sterkoppelaars enz. gemaakt worden. Nadeel van dit type component is dat complexere functies niet altijd even gemakkelijk te realiseren zijn en de afmetingen van de component snel toenemen.



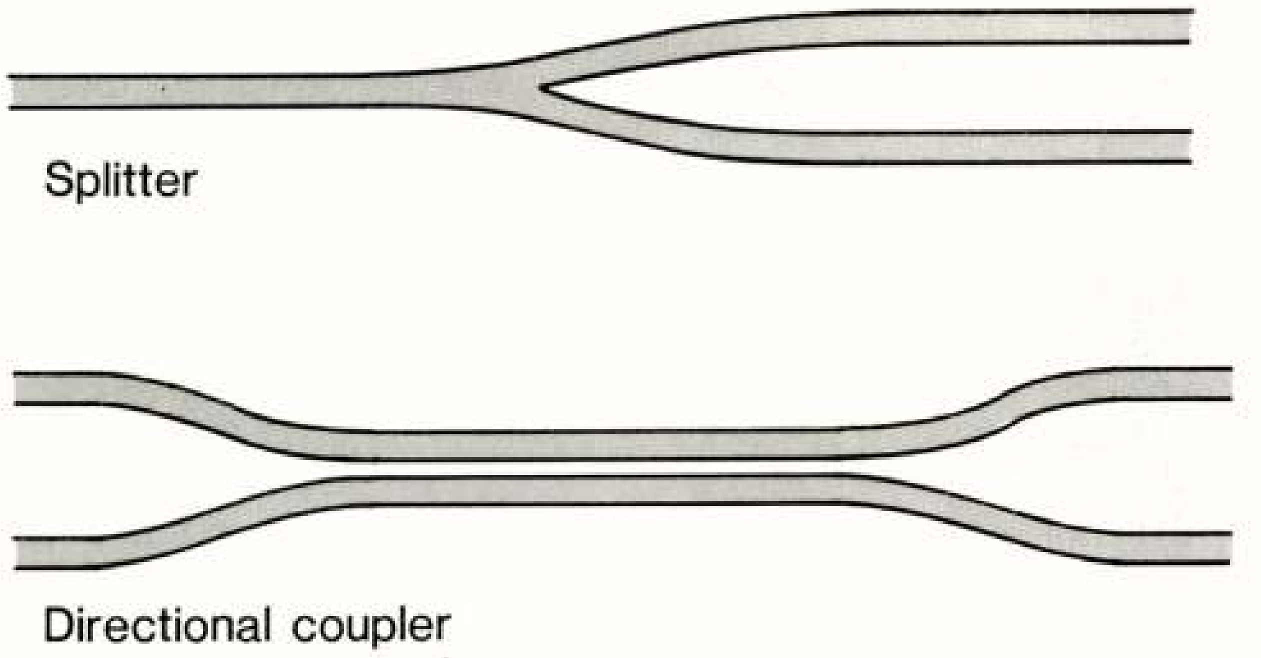
Figuur 2: Een voorbeeld van een splitter gemaakt met uitsluitend glasvezels

De nadelen van beide voorgaande typen componenten kunnen naar verwachting opgelost worden door gebruik te maken van planaire technologie. Bij dit type component wordt aan het oppervlak van een substraat een structuur aangebracht die overeenkomt met de structuur in een glasvezel, namelijk een kanaal van een materiaal met een hogere brekingsindex dan de brekingsindex van het materiaal eromheen. Het licht zal dan opgesloten zijn in dit kanaal en men spreekt van lichtgeleiding. In figuur 3 is aangegeven hoe op deze manier een splitter gemaakt kan worden. Voordeel van dit type component ten opzichte van glasvezelcomponenten is dat door een bredere keuze van substraat-materiaal en technologie om de brekingsindex te veranderen, meer mogelijkheden voorhanden zijn om een functie optimaal te verwezenlijken. Daarnaast zijn planaire optische componenten doorgaans veel kleiner dan vergelijkbare componenten van ander type en vaak geschikt voor massaproductie. Een nadeel ten opzichte van glasvezelcomponenten is dat glasvezels aan het substraat gekoppeld moeten worden, dit nadeel wordt echter relatief kleiner wanneer de functies complexer worden. Een ander nadeel is dat een twee dimensionale structuur beperkingen oplegt.



Figuur 3: Een planaire versie van een splitter. In het oppervlak van het substraat zijn lichtgeleidende kanalen gemaakt door plaatselijk de brekingsindex te verhogen.

De planaire optische componenten kunnen bijna allemaal opgebouwd worden uit twee basisstructuren. Dit zijn de zogenaamde Y-splitter of Y-junctie en de koppeling structuur (directional coupler). In figuur 4 zijn beide typen geschetst. De Y-junctie kan gebruikt worden als het licht over twee kanalen verdeeld moet worden. De directional coupler is veel complexer en mengt twee signalen met elkaar in een willekeurige verhouding. De werking berust op het op enkele µm van elkaar liggen van twee lichtgeleidende kanalen waardoor een koppeling tussen de electromagnetische velden van het licht in de kanalen onstaat. Hierdoor zal het licht periodiek van het ene kanaal naar het andere verschuiven. De koppeling is behalve van de lengte afhankelijk van de brekingsindexverschillen tussen de kanalen en het omliggende materiaal en van de afstand tussen de kanalen. De mogelijkheden van deze structuur zijn erg groot mede omdat de koppeling ook golflengte- en polarisatie afhankelijk is. Door de grote gevoeligheid is het echter moeilijk deze structuren met de gewenste nauwkeurigheid te maken.



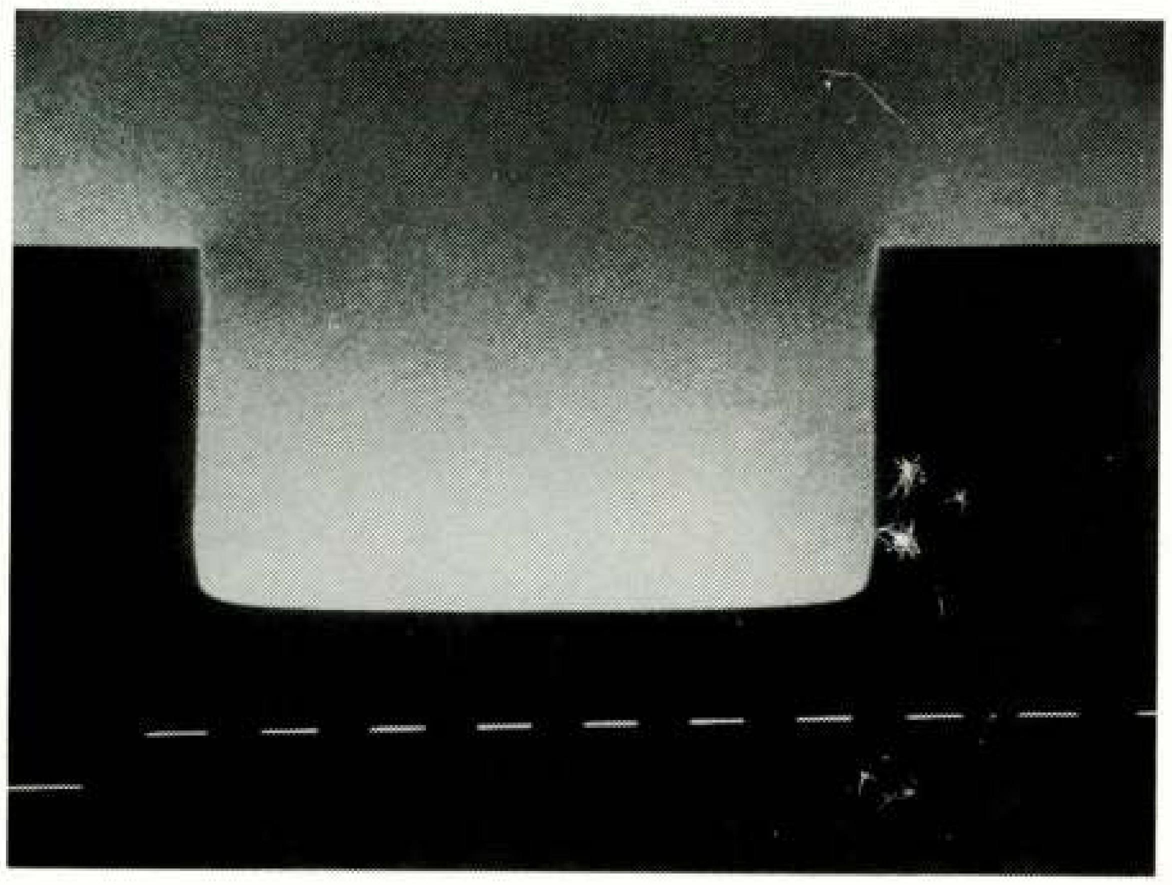
Figuur 4: De meeste planaire optische componenten kunnen samengesteld worden uit een combinatie van deze twee basisstructuren.

Technieken voor geintegreerde optische componenten.

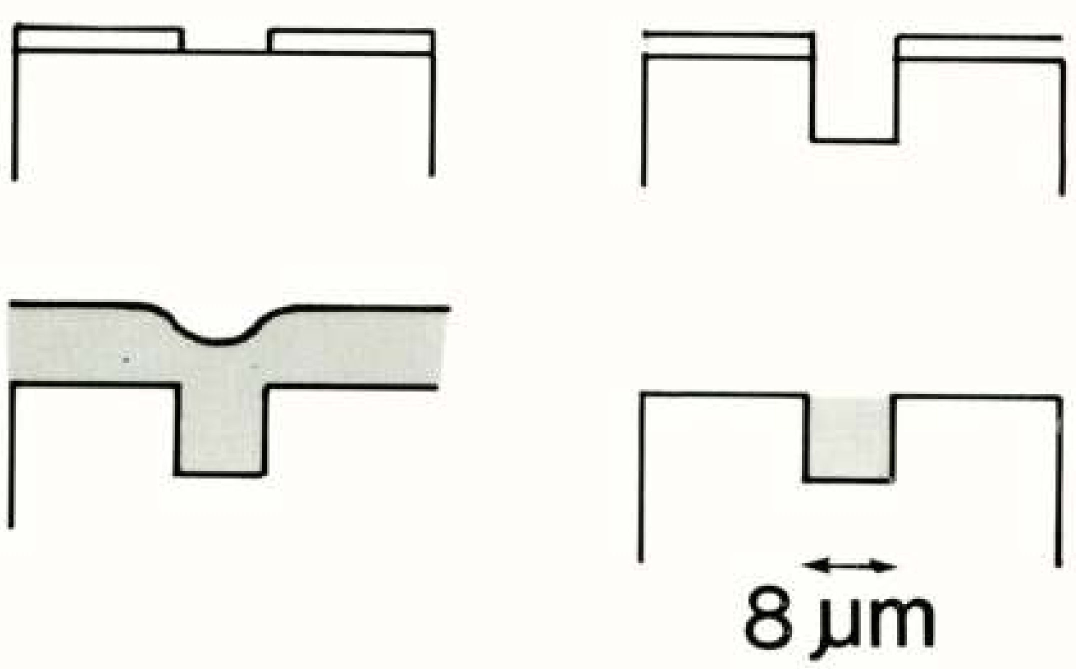
Planaire componenten hebben een brekingsindex structuur die vergelijkbaar is met de structuur van een glasvezel, een lichtgeleidend medium met een hogere brekingsindex dan dat van het omliggende materiaal. In het oppervlak van een substraat moeten dan ook structuren aangebracht worden waar de brekingsindex hoger is. Voor passieve componenten wordt als substraat materiaal hoofdzakelijk glas of kwarts gebruikt. Deze materialen zijn over het algemeen optisch transparant en bewerkingsmethoden zijn al voor andere toepassingen bekend.

Het is niet moeilijk meerdere technieken te bedenken waarmee plaatselijk de brekingsindex veranderd kan worden. Ik wil mij hier beperken tot twee veel gebruikte technieken waarmee lichtgeleiders in glas gemaakt kunnen worden. Op een kwarts substraat wordt een metaallaag aangebracht waarin het gewenste patroon geëtst wordt. Deze metaallaag dient nu als masker voor een proces waarmee groeven in het substraat geëtst worden. Om de vorm van de groef goed te kunnen controleren wordt gebruik gemaakt van reactief ionen etsen (RIE). Dit proces geschiedt anisotroop waardoor het mogelijk is groeven met rechte wanden te maken (figuur 5). De groeven worden dan opgevuld met een materiaal met een hogere brekingsindex dan die van het substraat. Verschillende depositietechnieken zijn hiervoor geschikt alhoewel de meeste experimenten met het sputterproces zijn uitgevoerd. De brekingsindex van het materiaal kan gevarieerd worden door de samenstelling te wijzigen. Het overtollige mate-

riaal wordt door middel van etsen of polijsten verwijderd, waardoor de gewenste lichtgeleider ontstaat. In figuur 6 zijn de processtappen geschetst. Eventueel kan het geheel nog afgedekt worden met een deklaag ter bescherming.



Figuur 5: Een rechthoekige groef door middel van reactief ionenetsen in een kwartssubstraat. De groef is ongeveer 7 μm diep en 12 μm breed.



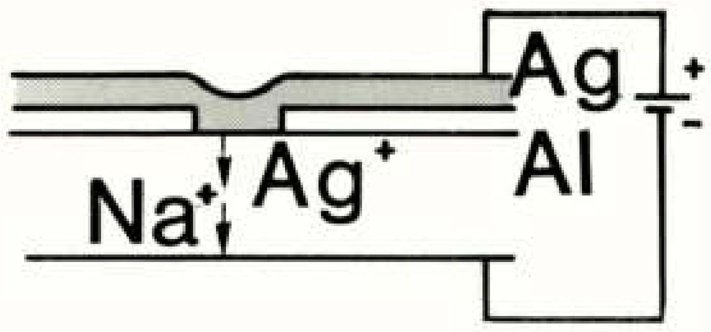
Figuur 6: Opeenvolgende proces stappen voor het maken van een lichtgeleider.
a. substraat met masker;
b. groef in het substraat d.m.v. reaktief ionenetsen;
c. opvullen van de groef d.m.v. sputteren;
d. verwijderen van het overtollige materiaal.

Een andere veel gebruikte methode is de ionenuitwisseling (Doremus 1964, Findakly 1985). Ionen uit het oppervlak van een glassubstraat worden uitgewisseld tegen ionen met een grotere polariseerbaarheid, waardoor de brekingsindex van het materiaal toeneemt. In figuur 7 is dit proces weergegeven. Een veel gebruikte uitvoering van deze techniek is de vervanging van natrium ionen in het glas tegen zilver of kalium ionen. Het gewenste patroon is weer in een als masker fungerende metaallaag geëtst, waarna het glassubstraat in een bad met gesmolten zilver- of kaliumnitraat gehangen wordt. Door het concentratieverschil van natrium en bijvoorbeeld zilver in het glas en de smelt zullen natrium ionen uit het glas migreren en zilverionen daarvoor in de plaats komen. De diffusiediepte is behalve van de glassamenstelling en de bij het proces betrokken ionen sterk afhankelijk van de temperatuur. In tegenstelling tot de lichtgeleidende kanalen gemaakt door het opvullen van groeven, hebben de kanalen gemaakt via ionenuitwisseling geen constante brekingsindex, maar een brekingsindex die afneemt naarmate de afstand tot het uitwisselpunt aan het oppervlak groter wordt. Bij het uitwisselpunt is namelijk al het natrium vervangen door zilver, terwijl de vervanging geleidelijk minder wordt. Voor kalium verloopt het proces op dezelfde manier met dien verstande dat de brekingsindexverhoging bij zilver een factor 10 tot 20 groter is dan bij kalium.

Een variant op dit proces is het ion-diffusie proces. Hierbij wordt, na het etsen van het patroon in de metaallaag, het substraat afgedekt met een zilverlaag. Over het glas wordt nu een spanningsverschil gezet. De positieve natrium ionen in het glas zullen onder invloed van het electrische veld naar de kathode migreren en geven daardoor aan de anodekant zilverionen de kans in het oppervlak van het glas te dringen (figuur 8).



Figuur 7: Lichtgeleiders gemaakt met ionenuitwisseling. Door concentratieverschillen worden natrium en zilverionen tegen elkaar uitgewisseld op de open plaatsen in het masker.



Figuur 8: Onder invloed van een electrisch veld zullen de positieve natrium ionen naar de kathode migreren. Hierdoor kunnen zilverionen aan de anodekant, op de open plaatsen van het masker, in het glas dringen.

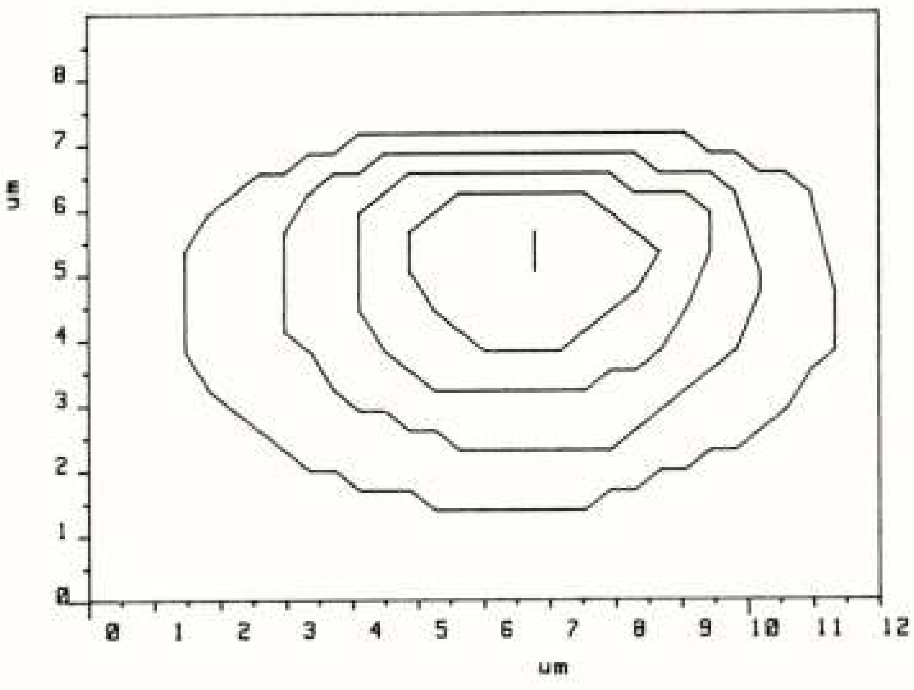
Technologie.

Aan de hand van het ionen uitwisselproces zullen nu enkele problemen inherent aan de fabricage van geinte-

greerde optische componenten aangehaald worden. Voor het maken van de maskers met het gewenste patroon wordt vaak gebruik gemaakt van electronen bundel patroon generatoren. Deze apparaten worden hoofdzakelijk gebruikt voor het definieren van electronische schakelingen en zijn daarom ingesteld op rechthoekige structuren. De gewenste gekromde structuren moeten opgebouwd worden uit een groot aantal rechthoeken of trapezia, waarbij het belangrijk is dat alle elementen goed op elkaar aansluiten. Om dit ontwerpen eenvoudiger te maken is aanpassing van de software en hardware noodzakelijk.

Om verstrooiing van licht aan de randen van de lichtgeleider te voorkomen, moeten de wanden van de lichtgeleider zo glad mogelijk zijn. Dit betekent dat uitgegaan moet worden van een zorgvuldig gepolijst en schoongemaakt substraatoppervlak en dat het patroon zonder rafelige randen in de op het subtraat aangebrachte metaallaag geëtst moet worden. Ook moeten de processtappen zoveel mogelijk stofvrij en zonder het oppervlak aan te raken uitgevoerd worden.

De procesparameters zoals temperatuur en tijd bepalen de indringdiepte van de ionen in het glas. Gecombineerd met de breedte van de kanalen in het masker worden daarmee de dimensies van de lichtgeleider vastgelegd. De brekingsindexverhoging wordt hoofdzakelijk bepaald door het soort glas en het uit te wisselen ion. In het algemeen heeft het op deze manier gemaakte kanaal niet de afmetingen en brekingsindexverschil die gewenst zijn. Wanneer monomodus componenten gemaakt worden, betekent dit niet alleen dat maar één modus in het kanaal kan propageren, ook dienen er monomodusglasvezels aangekoppeld te worden. Deze koppeling is alleen efficient als de modus in de glasvezel goed past op die in het kanaal, met andere woorden als de twee modi dezelfde vorm hebben. Een lichtgeleider is monomodus voor een bepaalde golflengte als de afmetingen van de lichtgeleider en het brekingsindexverschil maar klein genoeg zijn, aan de koppelingsvoorwaarde is echter pas voldaan als het brekingsindexverschil tussen kanaal en omliggend materiaal hetzelfde is als het brekingsindexverschil tussen kern en mantel in de glasvezel en als de afmetingen van kanaal en kern overeenkomen. De kanalen gemaakt met ionenuitwisselen (zie figuur 9) hebben duidelijk niet de vorm van een monomodusglasvezel omdat de kanalen veel breder zijn dan diep en een glasvezel een circulair profiel heeft. Nabehandelingen zijn noodzakelijk om dit verschil te minimaliseren en een zo goed mogelijk koppeling te krijgen. Mogelijkheden hiervoor zijn: verhoging van de temperatuur, al of niet gecombineerd met een electrisch veld over het substraat,waardoor het diffusie profiel zich uitbreidt of een tweede uitwisselproces waarbij bijvoorbeeld een gedeelte van het uitgewisselde zilver weer vervangen wordt door natrium. Deze laatste behandeling heeft ook als voordeel dat de lichtgeleider iets onder het oppervlak komt te liggen waardoor de invloed van strooibronnen op het oppervlak kleiner wordt.



Figuur 9: Gemeten intensiteitsprofiel van licht in een lichtgeleider gemaakt met ionen uitwisseling in het oppervlak van een glassubstraat. Elk contour verbindt punten met dezelfde intensiteit.

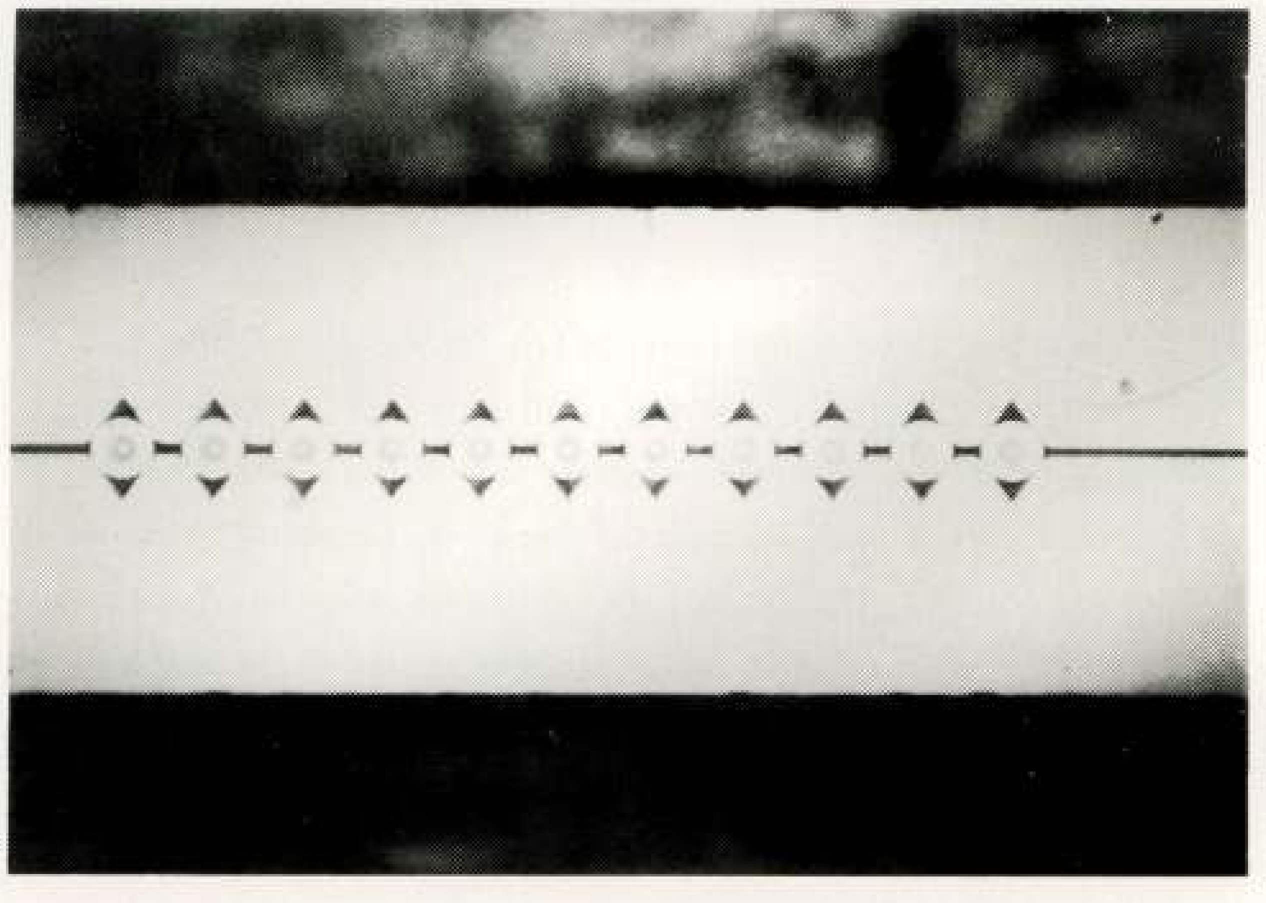
Behalve deze koppelverliezen en verstrooiing van licht aan de grenzen van de lichtgeleider, kan er ook demping ontstaan door absorptie van licht. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer zilver niet goed ingebouwd wordt in de glasstructuur. Het zilver conglomereert en er ontstaat een bruine laag die het licht sterk absorbeert. Dit soort lagen wordt verkregen als het ionenuitwisselproces bij een te hoge temperatuur uitgevoerd wordt.

Bij het opvullen van groeven zijn het soortgelijke problemen die opgelost dienen te worden voor het verkrijgen van bruikbare componenten.

Koppeling glasvezel.

Er zijn enkele manieren bekend om licht in een planaire lichtgeleider te brengen, maar tot op heden lijkt slechts een van deze methoden geschikt voor het permanent koppelen van glasvezels aan planaire componenten, de andere methoden zijn slechts geschikt voor laboratoriumdoeleinden. Bij deze koppeling wordt het substraat loodrecht op de kanalen doorgezaagd en het eindvlak gepolijst. De glasvezel wordt met geklieft of gepolijst eindvlak voor het kanaal gepositioneerd en bijvoorbeeld met behulp van lijm gefixeerd. Om de stabiliteit te vergroten kan de glasvezel eerst in een capillair geschoven worden of door een ander lichaam ondersteund worden. Nadeel van deze methode is dat elke glasvezel één voor één gepositioneerd moet worden voor het kanaal. Aangezien de kern van de glasvezel en het lichtgeleidende kanaal beide afmetingen hebben van ongeveer 10μm betekent dit een positionering binnen 0,5μm om een goede koppeling te waarborgen. Door de gecompliceerdheid van deze koppeling zou een groot deel van het voordeel van planaire compo-

nenten verloren gaan. Een betere oplossing is meerdere glasvezels tegelijkertijd voor de lichtgeleidende kanalen te positioneren. De afstand tussen de kanalen ligt in het ontwerp vast, als de glasvezels op dezelfde afstand van elkaar gelegd kunnen worden kan de koppeling veel eenvoudiger gebeuren. Een voorbeeld van deze techniek is het verlijmen van een rij glasvezels tussen twee blokken silicium V-groeven (zie figuur 10). Door anisotroop etsen waarbij de etssnelheid in een kristalrichting veel groter is dan in de andere richting is het mogelijk deze zeer nauwkeurige V-groeven te produceren. De rij glasvezels wordt daarna voor de desbetreffende kanalen gepositioneerd en gefixeerd. Ook deze oplossing is niet ideaal en nog veel onderzoek is noodzakelijk om dit vaak onvoldoende onderkende probleem op te lossen.



Figuur 10: Een rij glasvezels verlijmd tussen silicium blokjes waarin door middel van anisotroop etsen V-groeven gemaakt zijn.

Conclusies.

Het is duidelijk dat in toekomstige optische communicatiesystemen meer optische componenten gebruikt gaan worden dan in de nu operationele systemen, dit enerzijds door het complexer worden van de netwerkstructuur (abonneenetwerken, bedrijfsnetten) anderzijds doordat de transmissie geavanceerder zal worden (golflengte multiplexing of coherente systemen). Alhoewel schakelaars, modulatoren en andere actieve optische componenten daarin zeker gebruikt zullen worden, zijn in ieder geval passieve componenten noodzakelijk. De verwachting is dat in de toekomst hoofdzakelijk monomodus glasvezels gebruikt gaan worden.

Beschikbaarheid van deze monomodus passieve componenten bepaalt mede wanneer nieuwe systemen operationeel worden. Veel onderzoek wordt verricht op het gebied van planaire optica, ook wat betreft passieve componenten, vreemd genoeg is veel van dit onderzoek niet toegespitst op het vervaardigen van componenten maar blijft vaak steken bij optimalisatie van deeltechnologieën. Terwijl juist planaire optica goede mogelijkheden biedt passieve componenten te maken die wat betreft specificaties, prijs en aantallen kunnen voldoen aan de te verwachten vraag.

- Delange, O.E.; Optical heterodyne detection IEEE spectrum, oktober 1968
- Doremus, M.H.; Exchange and diffusion of ions in glass The Journal of Physical Chemistry, vol. 68, nr. 8 augustus, 1964
- Findakly, T. ; Glass waveguides by ion-exchange a review Optical Engineering, vol. 24, nr. 2, maart 1985
- Khoe, G.D. Dieleman, A. ; Toss: an integrated subscriber system for direct and coherent detection Journal of Lightwave Technology, vol. LT-4, nr. 7, juli 1986
- Okoshi, T. ; Recent progress in heterodyne/Coherent optical-fiber communication Journal of Lightwave Technology, vol. LT-2, nr. 4, augustus 1984

Voordracht gehouden tijdens de 344e werkvergadering.

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

Ing. J.A. Kegel, Bruntingerbrink 93, 7812 VH Emmen.
Ir. W.P. Wapenaar, Kennemerland 23, 2716 BR Zoetermeer.

Nieuwe leden

Dr.ir. G. Brussaard, Anjerstraat 37, 2461 TG Ter Aar.
Ing. H. Kuipers, Gr. Balthasarlaan 19, 3434 DN Nieuwegein.
Prof.dr. J. Middelhoek, Technische Universiteit, Postbus 217, 7500 AE Enschede.

Nieuwe adressen van leden

Ir. N.H.G. Baken, Schoolstraat 31, 2271 BZ Voorburg.
Ir. D. Beekman, Omloop 81, 4671 HW Dinteloord.
J. van Bruggen, Cavallilaan 16, 5654 BG Eindhoven.
Ir. G. van Dasler, Naarderstraat 116, 1272 NM Huizen.
Ir. C. Eberwijn, Savelsbos 177, 2716 HJ Zoetermeer.
Ir. C.A.M. Geus, Marsmanhove 104, 2726 CR Zoetermeer.
Ing. R. Hagedoorn, Chemin des Hauts Doigts, 78750 Moreil Marly, Frankrijk.
Ir. L. van der Hoek, Joh. van Oldenbarneveltlaan 29-B, 2582 NH 's-Gravenhage.
Ir. G. Hoenink, Burg. Bruinsmalaan 20, 1944 PC Beverwijk.
Ir. W.D. Meewezen, Hoeveweg 9, 1276 EZ Huizen.
Ir. F.Th.A. van Noesel, Treiler 9, 1276 EC Huizen.
R.L. Roling, Kerkstraat 1, 7496 PC Hengevelde.
Dr.ir. J. Smith, Lab. voor Medische Fysica, Neibergdreef 15, 1105 AZ Amsterdam.
Ir. R.A.C.M. van Spaendonk, Lindenlaan 24-A, 1271 BA Huizen.
Ir. T.W. van Steenbergen, Blauwe Hof 4328, 6602 ZV Wychen.
Ing. C.P.M. Willems, Herdershof 13, 4847 HT Teteringen.

Overleden

H.L. Swaluw, Gerard Bromlaan 17, 5624 GT Eindhoven.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
(344ste werkvergadering)
AFDELING TELECOMMUNICATIE VAN HET KIvI
IEEE BENELUX SECTIE



DRS. M. B. J. DIEMEER



IR. N. H. G. Baken



IR. H. ANGENENT

UITNODIGING

voor de lezingendag op **dinsdag 16 september 1986** in het **Dr. Neher Laboratorium van de PTT, St. Paulusstraat 4** te **Leidschendam.**
THEMA: PLANAIRE OPTISCHE TELECOMMUNICATIECOMPONENTEN.

PROGRAMMA

9.30 - 10.00 uur:	Ontvangst en koffie.
10.00 - 10.40 uur:	**PROF. DR. IR. H. BLOK**, (TH-Delft); INLEIDING.
10.40 - 11.20 uur:	**DRS. M. B. J. DIEMEER**, (PTT-Dr. Neher laboratorium); TOEPASSINGEN IN DE TELECOMMUNICATIE.
11.20 - 11.50 uur:	Koffiepauze.
11.50 - 12.20 uur:	Uitreiking Vederprijzen aan Dr. Ir. H. C. Nauta (TH-Delft) en Ir. W. van Eck (PTT-Dr. Neher laboratorium) door respectievelijk Prof. Dr. J. Arnbak en Prof. Ir. A. Kok.
12.20 - 14.00 uur:	Lunchpauze.
14.00 - 14.45 uur:	**IR. N. H. G. Baken**, (PTT-Dr. Neher laboratorium); ONTWERPASPECTEN VAN DE GEÏNTEGREERDE OPTICA.
14.45 - 15.15 uur:	Theepauze.
15.15 - 16.00 uur:	**IR. H. ANGENENT**, (Philips Natuurkundig Laboratorium): PASSIEVE PLANAIRE COMPONENTEN.

Aanmelding dient te geschieden door inzending van de aangehechte kaart, **gefrankeerd** met een postzegel van **55 cent**, alsmede overmaking van de verschuldigde kosten op girorekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam onder vermelding van "Planaire Optische Telecommunicatiecomponenten".
De aanmelding is alleen geldig indien de aanmeldingskaart en overschrijving zijn ontvangen vóór 10 september 1986.
In verband met de plaatsruimte is het aantal deelnemers beperkt tot 120.
De deelname voor leden van NERG, KIvI en IEEE is gratis en voor introducee's *f* 15,00 per deelnemer.
De lunchkosten bedragen *f* 15,00.
Het dichtstbijzijnde N.S.-station is het station Leidschendam/Voorburg.
Op het terrein van het Dr. Neher Laboratorium is beperkte parkeergelegenheid.

Namens de samenwerkende verenigingen,
IR. H. B. GROEN, NERG.
Tel. 070 - 755739.

Leidschendam, augustus 1986.

Conferentieaankondigingen

ESSCIRC '87; Thirteenth European Solid State Circuits Conference; Bad Soden, Federal Republic of Germany; September 23-25, 1987. Call for papers 1 maart 1987; contactadres: Dr. G.Albert, TH Darmstadt, Institut für Halbleitertechnik, Schlossgartenstrasse 8, D-6000 Darmstadt, F.R. of Germany.

European Conferense on Power Electronics and Applications; Grenoble, France; 22-24 September 1987; Call for papers 15 december 1986; Contactadres: Secrétariat CCI, 1 Place André-Malraux, BP297 38016 Grenoble cedex France Tel. 76460651.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 51 - nr. 5/6 - 1986

druk: De Witte, Eindhoven